



Escola Politècnica Superior
d'Enginyeria de Vilanova i la Geltrú

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

PROYECTO FIN DE CARRERA

TÍTOL: Regulación de tensión en inversores trifásicos sometidos a huecos de tensión desequilibrados

AUTOR: Ignacio Pérez Gómez

TITULACIÓ: E.T.I. Electrónica industrial

DIRECTOR: Castilla Fernández Miquel

DEPARTAMENT: 710 Ingeniería Electrónica

DATA: 25 de junio de 2012

TÍTULO: Regulación de tensión en inversores trifásicos sometidos a huecos de tensión desequilibrados

APELLIDOS: Pérez Gómez

NOMBRE: Ignacio

TITULACIÓN: Ingeniería Técnica Industrial

ESPECIALIDAD: Electrónica Industrial

PLAN: 95

DIRECTOR: Castilla Fernández Miquel

DEPARTAMENTO: 710 Ingeniería Electrónica

CALIFICACIÓN DEL PFC

PRESIDENTE

**TRIBUNAL
SECRETARIO**

VOCAL

FECHA DE LECTURA: 03 – 07 – 2012

Este Proyecto tiene en cuenta aspectos medioambientales: ☒ Sí ☐ No

PROYECTO FIN DE CARRERA

RESUMEN (máximo 50 líneas)

Este proyecto diseña el control de un inversor trifásico fotovoltaico con capacidad de inyección de potencia activa y reactiva a la red eléctrica cuando aparecen huecos de tensión.

Para ello se ha dividido en dos fases: En la primera parte se estudia el comportamiento estático del sistema para observar cómo reacciona a las variables de entorno. Es en la segunda etapa dónde se crea el algoritmo de control tomando como referencia las tendencias observadas en la primera etapa.

Una vez expuestas detalladamente las distintas estrategias se realiza una comparación de sus funcionalidades mediante los resultados obtenidos de diferentes pruebas realizadas en el entorno de programación Matlab Simulink.

Palabras clave (máximo 10):

Trifásica	Reactiva	Activa	Red
Algoritmo	Kp	Planta	Control
Hueco	Inversor		



ÍNDICE

1	Introducción	9
1.1	Justificación del problema.....	9
1.2	Especificaciones básicas	10
1.3	Objetivos	10
1.4	Medios necesarios y su disponibilidad.....	11
1.5	Planificación del trabajo.....	11
2	Fallos de la red eléctrica.....	13
2.1	Introducción	13
2.2	Tipos de variaciones de la tensión.....	14
2.2.1	Transitorios.....	14
2.2.2	Huecos de tensión (Sag o Dip).....	15
2.2.3	Elevaciones de tensión (Swell).....	15
2.2.4	Interrupciones.....	15
2.2.5	Voltajes Flicker (Parpadeos)	15
2.3	Perturbaciones de la tensión	16
2.4	Normativa española referente a perturbaciones en la red eléctrica	16
2.5	Huecos de tensión.....	17
2.5.1	Definición.....	17
2.5.2	Características de los huecos de tensión.....	17
2.5.3	Clasificación de los huecos de tensión	22
2.5.4	Causas de los huecos de tensión.....	23
2.5.5	Tipos de fallos que más se representan en huecos de tensión	23
3	Inversor trifásico	25
3.1	Introducción	25
3.2	Paneles fotovoltaicos.....	26
3.3	Inversor trifásico	26
3.3.1	Principio básico	26
3.3.2	Ondulación	26
3.4	Filtrado	27
3.5	Red eléctrica.....	28
3.6	Señales de puerta y control.....	28
3.7	Generador de huecos	28
3.7.1	Definición de sistema homopolar.....	28
3.7.2	Características del generador.....	29

3.8	Conclusiones	29
4	Control del inversor.....	31
4.1	Introducción	31
4.2	Extractor de secuencias positiva y negativa	32
4.3	Generador de corrientes de referencia.....	32
4.3.1	Control por corriente	33
4.3.2	Control por potencia.....	33
4.4	Modulación vectorial.....	34
4.5	Conclusiones	36
5	Comportamiento estático del sistema.....	37
5.1	Introducción	37
5.2	Estudio de planta a 90°	39
5.2.1	Inyección de potencia activa	39
5.2.2	Inyección de potencia reactiva	40
5.3	Estudio de planta a 0°	41
5.3.1	Inyección de potencia activa	41
5.3.2	Inyección de potencia reactiva	42
5.4	Estudio de planta a 30°	44
5.4.1	Inyección de potencia activa	44
5.4.2	Inyección de potencia reactiva	45
5.5	Conclusiones	46
6	Estrategias de inyección de potencia durante huecos de tensión	49
6.1	Introducción	49
6.2	Inyección de potencia en una planta de 30°.....	49
6.3	Inyección de potencia activa	50
6.3.1	Inyección de potencia activa por secuencia positiva.....	50
6.3.2	Inyección de potencia activa por secuencia negativa	51
6.4	Inyección de potencia reactiva	52
6.4.1	Inyección de potencia reactiva por secuencia positiva.....	52
6.4.2	Inyección de potencia reactiva por secuencia negativa.....	53
6.5	Inyección combinada de potencias (P, Q) y secuencias (V+, V-).....	54
6.6	Conclusiones	55
7	Nuevo algoritmo de control.....	57
7.1	Introducción	57
7.2	Algoritmo	58
7.2.1	Detección tanto de inicio como finalización del fallo en la red.	58

7.2.2	Caracterizar fallo	59
7.3	Resultados	64
7.3.1	Hueco tipo A	64
7.3.2	Hueco tipo C.....	66
7.3.3	Hueco tipo D	68
8	Conclusiones y perspectivas de trabajo.....	71
8.1	Conclusiones	71
8.2	Perspectivas de trabajo	71
	Referencias	73



1 Introducción

Día tras día observamos como las energías renovables o verdes proliferan en todo el mundo debido al impacto medioambiental y la escasez de recursos que producen las no renovables. Algunos ejemplos son Hidráulica, solar térmica, biomasa, solar, eólica, geotérmica.

Este proyecto está basado en la energía solar. Utilizando paneles fotovoltaicos la energía solar puede transformarse en energía eléctrica.

Cada panel se comporta como una fuente de potencia y esta aparece en sus terminales de salida como un valor continuo de tensión y de corriente conocido como corriente continua. Esta potencia que se pretende inyectar en la red deberá transformarse mediante un inversor trifásico en corriente alterna. El inversor consigue tratar las señales obteniendo las características necesarias para poder ser inyectadas en la red eléctrica.



Figura 1.1:1 - Esquema general de inyección a red. (Paneles fotovoltaicos – Inversor trifásico – Red eléctrica)

Como todo sistema, nada se encuentra exento de problemas y en la generación de energía también los hay. Pueden darse distintas anomalías en la red a lo largo de su distribución que provocan severos problemas tanto en el ámbito industrial como el doméstico. Los picos de tensión y las interrupciones son problemas relacionados de la calidad de la energía. Ambos ocurren generalmente por el resultado de fallos en el funcionamiento del sistema y de la conmutación de energía para aislar las secciones críticas, siendo caracterizados por variaciones del voltaje RMS fuera del rango de operación normal de la tensión.

Los fallos de red, entre ellos los huecos de tensión en los que se centra el proyecto, pueden ser solventados mediante la inyección de energía en forma de potencia reactiva. Siguiendo diferentes estrategias, dependiendo de la gravedad de los huecos podremos solventarlos gracias al nuevo algoritmo de control propuesto.

1.1 Justificación del problema

La motivación principal de la realización de este proyecto se centra en investigar nuevas técnicas para obtener un máximo rendimiento de las energías renovables y a su vez encontrar nuevas utilidades.

Hoy en día se hace imprescindible centrar esfuerzos en esta dirección a causa del desgaste del planeta producido por los gases de efecto invernadero. Como consecuencia de ello, está demostrado que la energía solar fotovoltaica es una forma limpia de obtener energía. Dada la

situación geográfica de nuestro país es la forma de energía limpia con más proyección de futuro y con más impacto y crecimiento.

Asimismo los huecos de tensión producen efectos en los equipos que se ven sometidos a ellos, en función de las características propias de estos y de la naturaleza del equipo afectado y del tipo de conexión a la red. Además suceden pérdidas de información en sistemas informáticos, alteración de funcionamiento de controladores electrónicos de procesos en tiempo real o interrupción de procesos, interrupción de sistemas de iluminación y efectos económicos.

El trabajo realizado se ocupará del control del inversor fotovoltaico para determinar cuanta energía hemos de inyectar y cuando dependiendo del estado de la red eléctrica.

1.2 Especificaciones básicas

La realización práctica de este proyecto se ha llevado a cabo en el entorno de simulación Matlab-Simulink.

Por concordancia con la mayor parte de la bibliografía consultada y una correcta comparación con los resultados obtenidos en las simulaciones, se ha decidido trabajar con los parámetros de la red eléctrica Europea. Estos son: 325V de pico (230V eficaces), una frecuencia de red de 50Hz y tres fases desfasadas 120° entre ellas (véase Figura 1.2:1 – Red trifásica Europea).

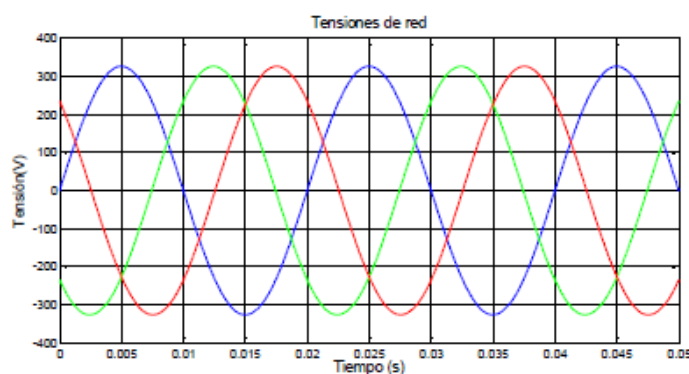


Figura 1.2:1 – Red trifásica Europea

La planta del sistema con la que se ha estudiado el sistema es de 30° respecto a una impedancia (Z) total de 1.57079. En el capítulo **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se explica con detalle las características de la planta.

El inversor fotovoltaico tiene una potencia de 10KVA_r. Se trata de un inversor trifásico de dos niveles que consta de seis interruptores repartidos tres y tres que conmutarán de manera sincronizada para poder inyectar potencia activa y reactiva en la red. Para más información ver capítulo 3.3

1.3 Objetivos

El objetivo del proyecto es crear un nuevo algoritmo de control para que el sistema sea capaz de inyectar energía a la red mediante un inversor trifásico, tanto en condiciones normales como en

una situación de fallo. En el caso estudiado, la aparición de un hueco de tensión. Para esto es básico estudiar el control aplicado al inversor trifásico de dos niveles, así como las características de los fallos de red y el sistema de inyección de energía cuando la red está en fallo para poder corregir la incidencia.

En condiciones normales el sistema debe tratar de entregar la máxima potencia activa y bajo fallos de red, el algoritmo creado debe detectar el hueco de tensión, caracterizarlo y solventarlo inyectando tan sólo la potencia reactiva necesaria para que el sistema no se desconecte de la red eléctrica, continúe entregando energía y eleve la tensión a un valor normalizado. Una vez desaparecida la incidencia, el algoritmo propuesto debe devolver el inversor a su funcionamiento normal entregando la máxima potencia activa a la red.

Por último, se estudiarán diferentes estrategias de inyección de potencia reactiva, para solventar las incidencias de la red eléctrica siendo estas contrastadas según los diversos tipos de huecos de tensión estudiados.

1.4 Medios necesarios y su disponibilidad.

Para la realización del proyecto se ha utilizado el laboratorio AL-102 que cuenta con seis ordenadores con el software Matlab®. Todos ellos imprescindibles para los múltiples tests llevados a cabo ya que varias operaciones tardan varias horas en ofrecer resultados.

1.5 Planificación del trabajo

Para la concepción de este trabajo la estructura se ha dividido en dos partes claramente diferenciadas.

- **Análisis del sistema:** En los primeros meses se ha estudiado el comportamiento del sistema de forma estática, es decir sin la generación de ningún fallo en la red. Asimismo se han caracterizado los parámetros que intervendrán en el control para hallar tendencias y poder solventar los huecos de una manera eficiente.
- **Creación del algoritmo:** En esta fase se crea el algoritmo de control que evalúa la red constantemente e inyecta la potencia adecuada para elevar la tensión si ha caído por un hueco o proporcionar la mayor cantidad de potencia activa en caso de comportamiento normal.



2 Fallos de la red eléctrica

2.1 Introducción

En las primeras instalaciones de distribución de energía eléctrica tan sólo era importante la continuidad del suministro eléctrico. Actualmente, no sólo es necesaria la continuidad del suministro eléctrico sino que también es necesaria la calidad, es decir que la tensión y la frecuencia se mantengan dentro de unos márgenes.

La continuidad, fiabilidad y calidad del servicio eléctrico ha llegado a ser extremadamente crucial para muchos usuarios de energía eléctrica debido al uso cada vez mayor de controles sofisticados y equipamiento industrial. Los sistemas eléctricos están sujetos a una amplia variedad de problemas de calidad de energía, que pueden interrumpir procesos de producción, afectar equipos sensibles y causar tiempos muertos, desechos y pérdidas en la capacidad productiva. Las fluctuaciones momentáneas de tensión impactan desastrosamente en la producción

La red eléctrica europea determina unas características de las tensiones de red que deben ser de una tensión eficaz de 230V a una frecuencia de 50 Hz (Figura 2.1:1 - Señales de red). Debido a fallos en el sistema en ocasiones no es posible garantizar que las características de la red se encuentren en estado óptimo y esta casuística es la que debe corregirse.

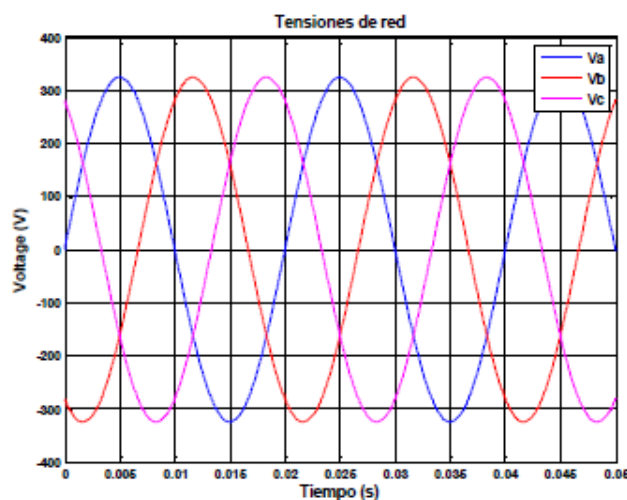


Figura 2.1:1 - Señales de red

2.2 Tipos de variaciones de la tensión

En este apartado se describirán las principales anomalías que se observan en la tensión de red
[[1] http://eia.udg.es/~secse/curso_calidad/].

2.2.1 Transitorios

2.2.1.1 Transitorio impulsivo

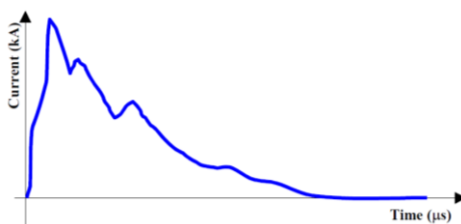


Figura 2.2:1 - Transitorio impulsivo

Es un cambio de frecuencia instantáneo a partir del estado estable de la corriente, el voltaje o ambos. Tiene una polaridad unidireccional y se caracteriza principalmente por sus tiempos de subida y bajada y su valor máximo.

2.2.1.2 Transitorio oscilante

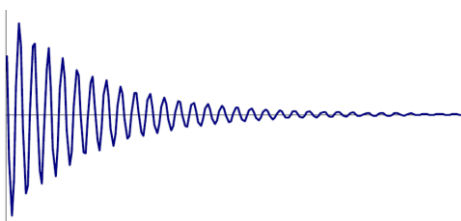


Figura 2.2:2 - Transitorio oscilante

Son señales de voltaje o corriente cuyos valores instantáneos cambian de polaridad rápidamente.

Alta frecuencia: $f > 500$ kHz y duración [microseg].

Media frecuencia: $5 < f < 500$ kHz y duración [décadas de microseg]

Baja frecuencia: $f < 5$ kHz y duración [0.3 a 50 ms]

2.2.2 Huecos de tensión (Sag o Dip)

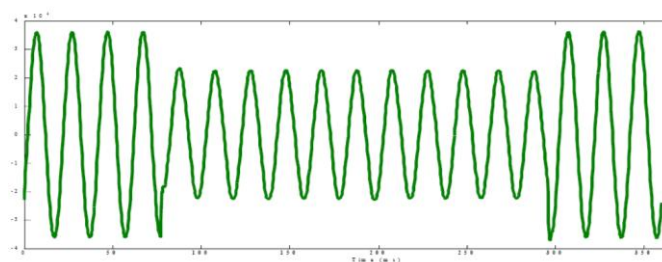


Figura 2.2:3 - Hueco de tensión

- Un hueco de tensión es la disminución del valor eficaz de la tensión entre el 0.9 y el 0.1 p.u. de la tensión de funcionamiento normal y tiene una duración que va desde medio ciclo (8ms o 10ms) hasta algunos segundos.

2.2.3 Elevaciones de tensión (Swell)

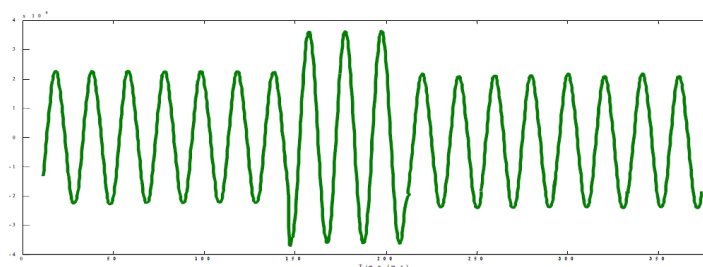


Figura 2.2:4 - Elevación de tensión

- Es un incremento del valor eficaz de la tensión entre el 1.1 y el 1.8 p.u. de la tensión de funcionamiento normal con una duración que va desde medio ciclo (8ms o 10ms) hasta algunos segundos.

2.2.4 Interrupciones

El 90% de las fallas en las líneas de distribución de alta son de naturaleza temporal (Fig.5). Típicamente estas fallas son resultado de relámpagos, ramas de árboles o animales causando desperfectos. Las líneas de distribución están protegidas por un restaurador. Éstos interrumpen las fallas y automáticamente cierran el circuito, o las vuelve a restaurar, y si la falla no se ha sanado, el restaurador permanece cerrado. Si la falla aún persiste, el restaurador se vuelve a cerrar automáticamente.

2.2.5 Voltajes Flicker (Parpadeos)

Los parpadeos son aquellos eventos que se pueden notar por una rápida sensación de baja de luz en las lámparas incandescentes o fluorescentes. Son el resultado de una rápida variación de voltaje entre el rango permisible de tolerancia que es de 90 a 110%. A la vez pueden ser el resultado de equipos que funcionan por arco eléctrico, máquinas de soldar o también de una gran cantidad de variadores ajustables

de velocidad con una conexión dc de filtros inadecuada. Con esto, las armónicas invertidas las cuales son una función que surgen de la frecuencia fundamental de 60 Hz, fluyen por el sistema de energía, causando múltiplos de la frecuencia fundamental de 60 Hz.

2.3 Perturbaciones de la tensión

- **Desbalance de tensión:** Condición para la cual las tres tensiones de un sistema trifásico, difieren en magnitud y/o no están desfasadas $2\pi/3$ radianes entre sí.
- **Magnitud del desbalance:** La máxima desviación de la magnitud de tensión de cada una de las tres fases con respecto a la magnitud promedio del sistema trifásico, dividida por la magnitud promedio.
- **Ángulo de fase del desbalance:** La máxima desviación de la diferencia de ángulos de fases entre las tres tensiones del sistema, dividida entre $2\pi/3$ radianes.
- **Relación de desbalance de secuencia negativa:** Es la relación entre las tensiones de la secuencia negativa y la secuencia positiva, multiplicada por 100%.
- **Relación de desbalance de secuencia cero:** Es la relación entre las tensiones de la secuencia cero y la secuencia positiva, multiplicada por 100%.
- **Muecas de tensión:** Conmutación entre las tensiones de un sistema trifásico u otro disturbio en la onda de tensión de duración menor a medio ciclo e inicialmente de polaridad contraria al de la onda de tensión.
- **Sobretensión subciclo:** Incremento repentino de la tensión de corta duración (menor a medio ciclo) y unidireccional.
- **Subtensión subciclo:** Decremento repentino de la tensión de corta duración (menor a medio ciclo) y unidireccional.
- **Tensión oscilatoria subciclo:** Incremento o decremento repentino de la tensión, seguido de una oscilación de corta duración (menor a medio ciclo). La frecuencia de la oscilación es similar a la frecuencia del sistema (50 o 60 Hz).

2.4 Normativa española referente a perturbaciones en la red eléctrica

España es un país destacado dentro de Europa en la redacción de un procedimiento de cumplimiento de la generación distribuida ante perturbaciones existentes en la red eléctrica. En concreto, en España es el Procedimiento de Operación 12.3 de REE el que establece los requisitos que han de cumplir las distintas instalaciones de producción en régimen especial a efectos de garantizar la continuidad de suministro frente a huecos de tensión, en cumplimiento

de lo establecido en la disposición adicional cuarta del Real Decreto 436/2004 [2]. Este procedimiento de operación se centra fundamentalmente en los huecos

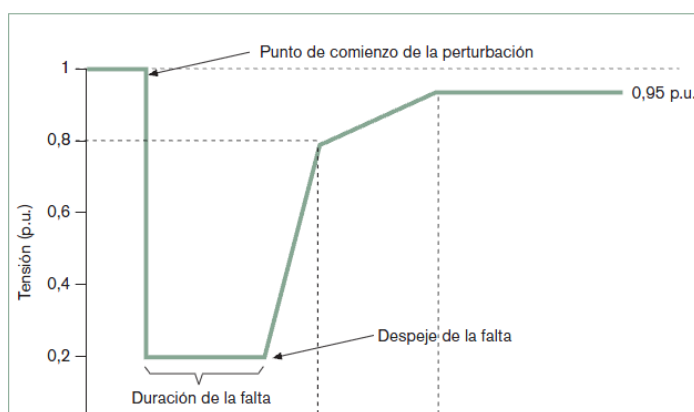


Figura 2.4:1 - Curva tensión-tiempo que define el área del hueco de tensión

de tensión estableciendo lo siguiente en la respuesta frente a cortocircuitos:

El titular de la instalación deberá adoptar las medidas de diseño y/o control necesarias para que todas las instalaciones de generación bajo su titularidad que estén incluidas en el ámbito de

aplicación del presente procedimiento, se mantengan acopladas al sistema eléctrico, sin sufrir desconexión por causa de los “huecos de tensión” directamente asociados a la existencia de cortocircuitos correctamente despejados que puedan presentarse en el sistema eléctrico.

La propia instalación de producción y todos sus componentes deberán ser capaces de soportar sin desconexión huecos de tensión, en el punto de conexión a red, producidos por cortocircuitos trifásicos, bifásicos a tierra o monofásicos, con los perfiles de magnitud y duración indicados en la figura 2. Es decir, no se producirá la desconexión de la instalación para huecos de tensión en el punto de conexión a red incluidos en el área sombreada de la mencionada Figura 2.4:1.

2.5 Huecos de tensión

2.5.1 Definición

Según la UNE-EN50160 [1] http://eia.udg.es/~secse/curso_calidad/

[2] [http://www.cne.es/cne/doc/legislacion/\(36\)RD436_2004.pdf](http://www.cne.es/cne/doc/legislacion/(36)RD436_2004.pdf)

[3] *Norma UNE-EN 50160. Características de la tensión suministrada por la redes de distribución. Octubre 1996.* un hueco de tensión es una disminución brusca de la tensión de alimentación a un valor situado entre el 90% y el 1% de la tensión declarada, seguida del restablecimiento de la tensión después de un corto lapso de tiempo. La tensión declarada es normalmente la tensión nominal de la red, excepto el caso de que se haya llegado a un acuerdo entre el distribuidor y el cliente.

La profundidad de un hueco de tensión es un valor porcentual que expresa la diferencia entre la tensión declarada y la tensión eficaz mínima alcanzada durante el hueco de tensión como se refleja en la norma IEC 61000-2-8 [4]. El valor de la tensión residual es el mínimo valor eficaz al que cae la tensión de la red.

Las duraciones de los huecos van desde el medio ciclo hasta el minuto, siendo la mayoría de una duración inferior a los tres segundos. Es el tiempo en el que el valor eficaz de la tensión ha sido inferior al 90% de la tensión declarada según la IEC 61000-2-8 [4].

2.5.2 Características de los huecos de tensión

- **Magnitud del hueco de tensión (UH):** Es la tensión eficaz existente durante el hueco de tensión en por unidad (p.u.) con respecto a la tensión pre-hueco (UH). (En caso de huecos no rectangulares, esta magnitud es función del tiempo).
- **Caída de tensión (ΔU):** Es la diferencia entre la tensión eficaz pre-hueco y la tensión eficaz durante el hueco (ΔU). (En caso de huecos no rectangulares, también es función del tiempo).
- **Duración del hueco de tensión (Δt):** Tiempo durante el cual la tensión eficaz es inferior al 0,9 p.u. y superior 0,1 p.u. de la tensión nominal (Δt).

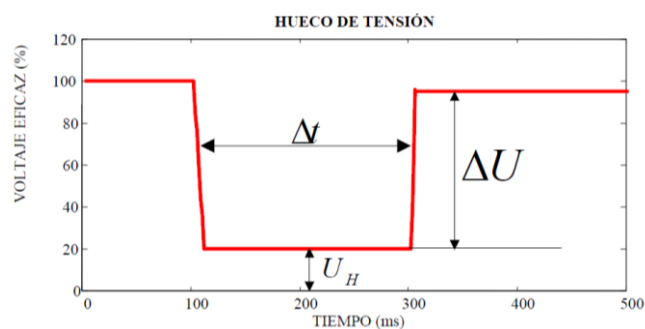


Figura 2.5:1 - Características de un hueco de tensión

- **Punto de inicio del hueco:** Ángulo de fase de la tensión fundamental en el momento en que se inicia el hueco (θ_i). Corresponde al ángulo de fase en el instante que ocurre una falla.
- **Punto de recuperación del hueco:** Ángulo de fase de la tensión fundamental en el momento en que se recupera la tensión (θ_r). Corresponde al ángulo de fase en el instante que se elimina la falla.

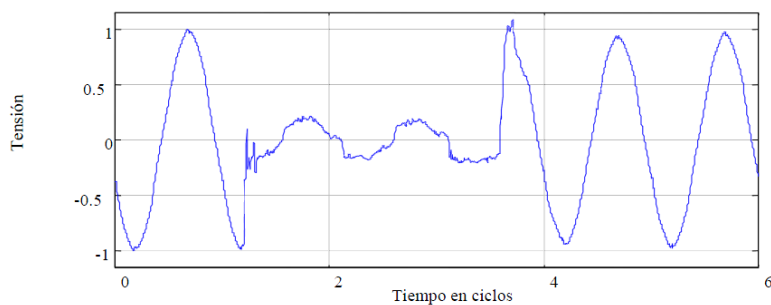


Figura 2.5:2 - Vista general de un hueco de tensión

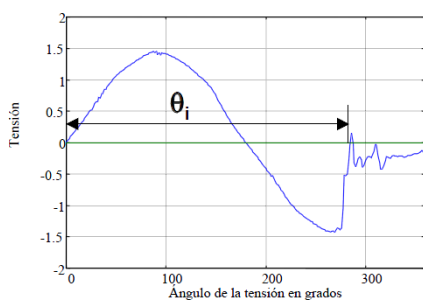


Figura 2.5:3 - Punto de inicio

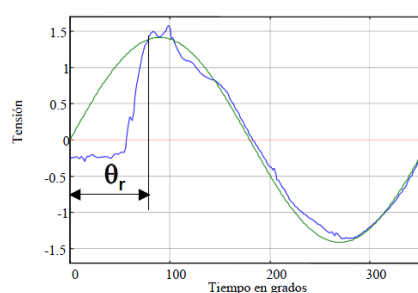


Figura 2.5:4 - Punto de recuperación

- **Hueco no rectangular:** Un hueco de tensión en el cual la magnitud del hueco no es constante con el tiempo.

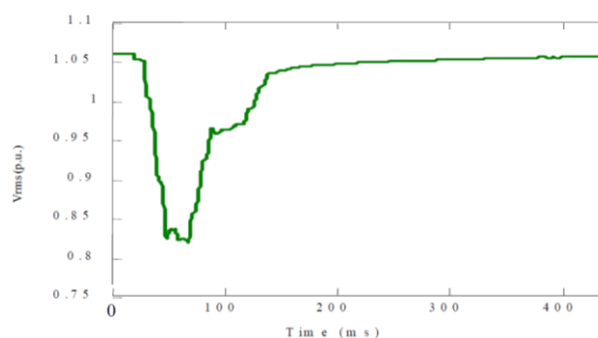


Figura 2.5:5 - Hueco no rectangular

- **Tensión pérdida:** Es la resta entre la tensión que habría si no existiera hueco de tensión y la tensión que hay durante el hueco.
- **Tensión pérdida compleja:** Es un número complejo que representa la tensión pérdida durante un hueco en una de las fases y corresponde a la resta en el plano complejo entre la tensión fundamental antes del hueco y la tensión fundamental durante el hueco.

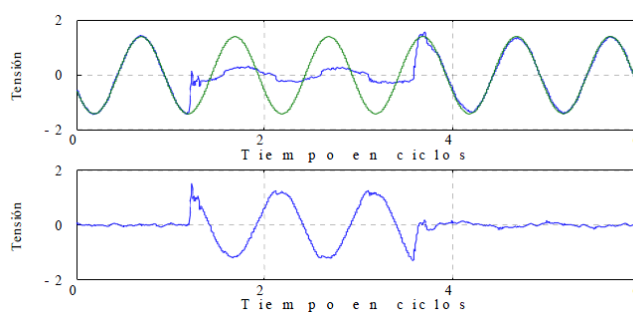


Figura 2.5:6 - Tensión perdida en hueco de tensión

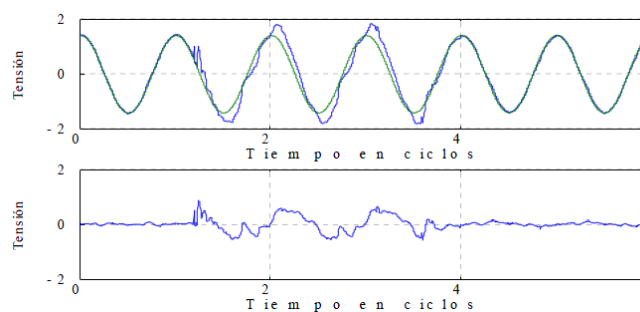


Figura 2.5:7 - Tensión perdida en sobretensión

- **Salto o desplazamiento del ángulo de fase:** Es la diferencia entre los ángulos de fase de las tensiones fundamentales existentes antes y durante el hueco de tensión.

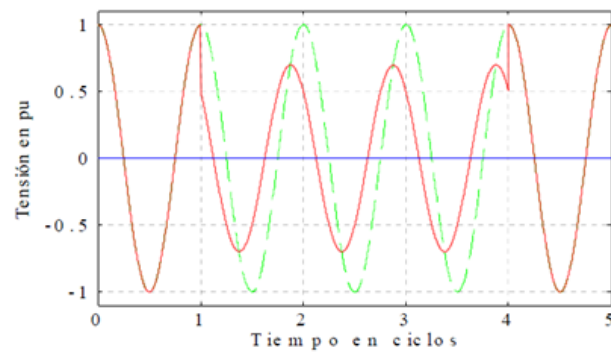


Figura 2.5:8 - Salto del ángulo de fase de $\pi/4$

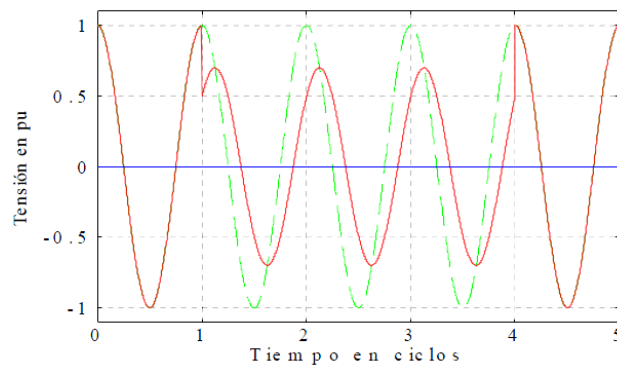
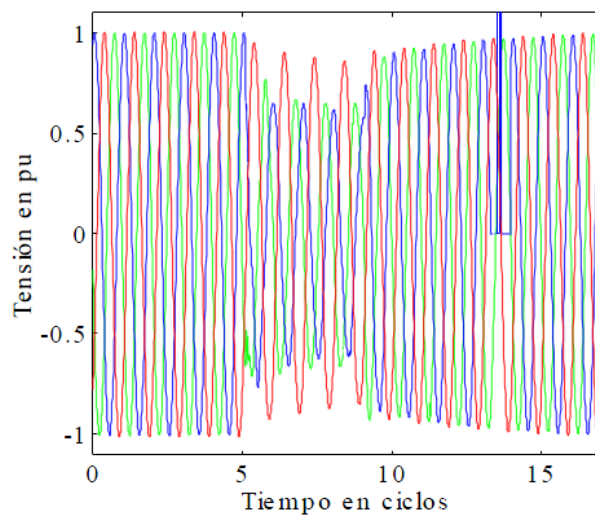


Figura 2.5:9 - Salto del ángulo de fase de $-\pi/4$

- Los huecos de tensión usualmente son caracterizados por su magnitud y duración



Fase A

Fase B

Fase C

Figura 2.5:10 - Tensión trifásica en p.u.

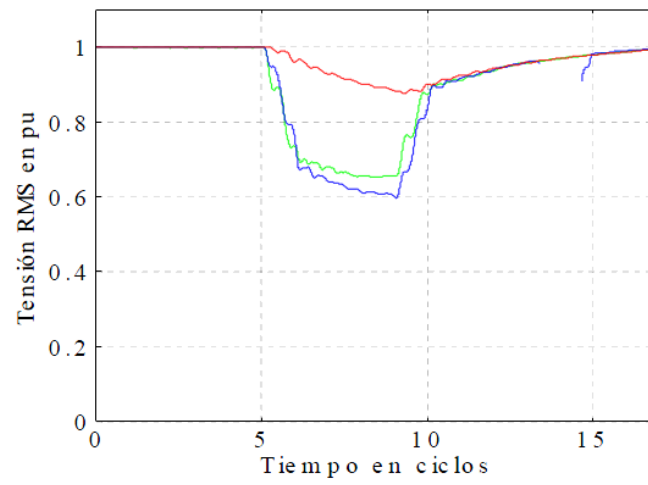
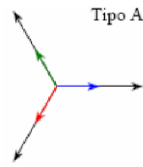
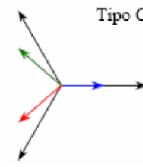
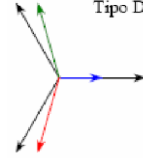


Figura 2.5:11 - Tensión RMS en p.u.

2.5.3 Clasificación de los huecos de tensión

Tipo	Descripción	Esquema
A	Se produce por un fallo trifásico y causa la reducción de la tensión en las tres fases. La tensión residual de las fases depende de la distancia entre la ubicación del fallo y la ubicación dónde se está observando el hueco de tensión.	 <p>Tipo A</p> <p><i>Figura 2.5:12 - Tipo A</i></p>
C	Es producido por un fallo fase – fase y causa una reducción de la tensión en dos fases, conjuntamente con cambios en el ángulo de fase.	 <p>Tipo C</p> <p><i>Figura 2.5:13 - Tipo C</i></p>
D	Debido a la ocurrencia de un fallo bifásico en el sistema se presenta un hueco de tensión dónde la tensión de cada una de las tres fases se reduce a valores distintos. Además de la reducción de tensión, los vectores de las fases afectadas cambian su posición haciendo que la diferencia angular difiera de los 120° entre fases.	 <p>Tipo D</p> <p><i>Figura 2.5:14 - Tipo D</i></p>

2.5.4 Causas de los huecos de tensión

- Fallos en los sistemas de potencia
 - Descargas atmosféricas, cortocircuitos, contaminación de aisladores, contacto de animales o árboles, accidentes...
 - Los fallos más comunes son las monofásicas (1-g)
 - Los fallos más severos son las caídas trifásicas (1-1-1)
- Arranque de grandes motores de inducción
- Cambios de carga

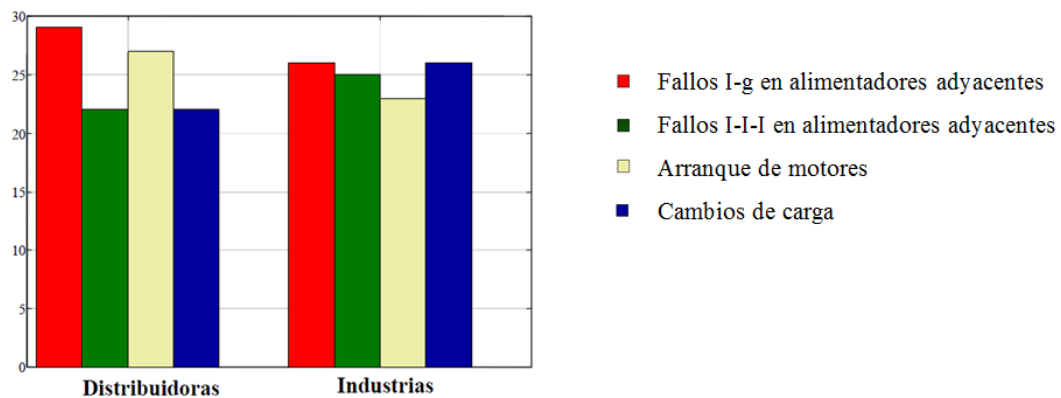


Figura 2.5:15 - Causas de los huecos de tensión

2.5.5 Tipos de fallos que más se representan en huecos de tensión

Fallos monofásicos: 66%

Fallos bifásicos: 17%

Fallos trifásicos: 17%

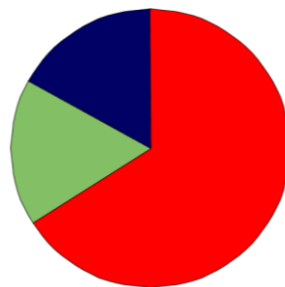


Figura 2.5:16 - Tipos de fallos que más se representan según EPRI



3 Inversor trifásico

En este capítulo se presentan los elementos que componen el sistema creado en Matlab.

3.1 Introducción

El sistema está compuesto por una serie de bloques los cuales combinados entre sí permiten representar una red trifásica a la cual se puede atacar generando huecos de tensión para estudiarlos y llegar a solventarlos mediante la inyección de potencia.

Esta inyección de energía a la red eléctrica se realiza utilizando un inversor trifásico de potencia con el cual se transforma la energía continua proveniente de los paneles fotovoltaicos a alterna que se entrega a la red. Este hecho se consigue gracias al uso del inversor trifásico, que está compuesto por interruptores de potencia (IGBT) que ondulan la señal, además de una serie de componentes pasivos (ver Figura 3.1:1) y un sistema de control que a través señales de conmutación actúan sobre los interruptores, haciéndolos actuar.

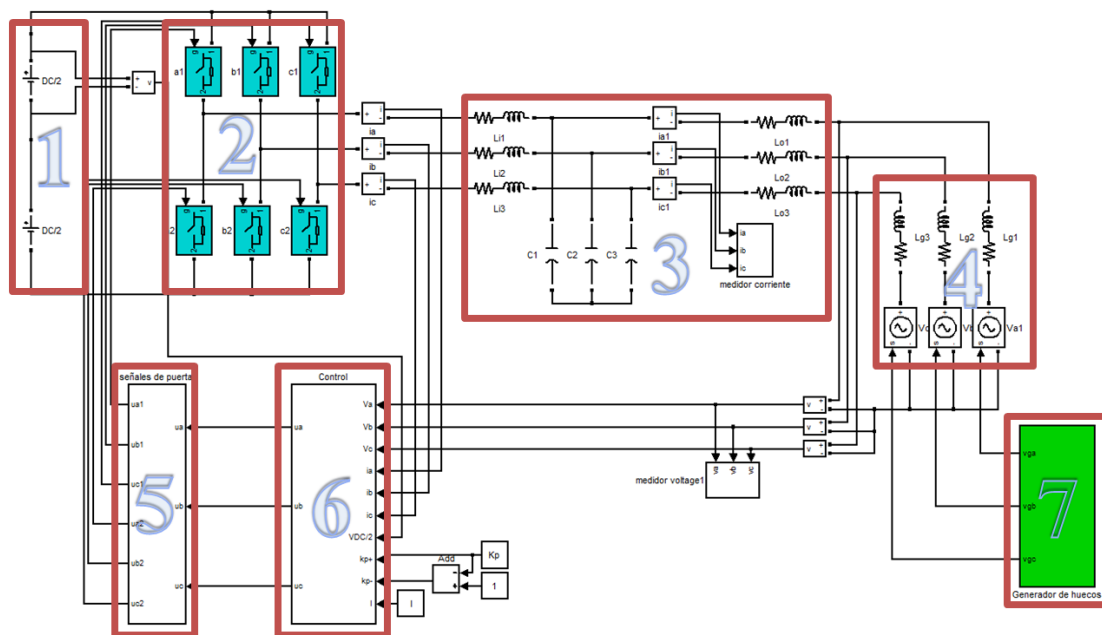


Figura 3.1:1 - Vista general del sistema

Los elementos en los que se divide el sistema son los siguientes:

1. Paneles fotovoltaicos
2. Inversor trifásico
3. Filtro
4. Red eléctrica
5. Señales de puerta
6. Control
7. Generador de huecos

3.2 Paneles fotovoltaicos

Los paneles fotovoltaicos están formados por un conjunto de celdas (células fotovoltaicas) que producen electricidad a partir de la luz que incide sobre ellos (electricidad solar). Concretamente generan una tensión de 325V y poseen un punto neutro entre ambas. Esto permite que a la salida de los dos interruptores de cada fase del inversor puedan darse tensiones de salida $V_{DC}/2$, cuando está activado el interruptor superior, así como $-V_{DC}/2$ cuando está activado el interruptor inferior.

3.3 Inversor trifásico

3.3.1 Principio básico

Un inversor de potencia es un convertidor electrónico. Su principal función es la de facilitar el intercambio de energía entre dos o más subsistemas y esto lo consigue mediante la transformación de señales continuas (DC), proveniente en este caso de los paneles fotovoltaicos, a señales alternas (AC) a las cuales funcionan las redes eléctricas.

En el sistema estudiado se ha empleado un inversor trifásico de dos niveles, compuesto por seis interruptores de potencia. Estos se reparten de tal manera que se encuentran dos por cada fase y controlados por unas señales que provienen del sistema de control.

3.3.2 Ondulación

El inversor trifásico es el encargado de transformar la señal continua proveniente de los paneles fotovoltaicos, a la señal alterna que será inyectada a la red. Esto se consigue ondulando las señales mediante la conmutación de los interruptores de potencia. Obteniendo a la salida una señal cuadrada por cada fase (véase la Figura 3.3:1 - V_a : Tensión de red V_a . V_{ta} : Señal tras pasar por los interruptores de potencia.) con valores de tensiones positivas $V_{DC}/2$ y negativas $-V_{DC}/2$.

La señal cuadrada generada no tiene un ciclo de trabajo (*duty cycle*) constante, sino que este va variando a lo largo del tiempo. Esta variación se produce debido a que la tensión de red, que nos viene dada, varía de forma senoidal periódicamente. Cuando esta tensión se encuentra en su pico positivo, el *duty cycle* de la señal cuadrada es el mayor y cuando la tensión se encuentra en su pico negativo, el *duty cycle* de la señal cuadrada es el menor.

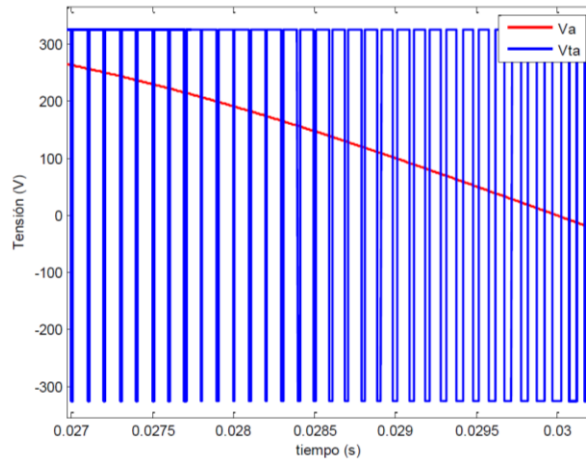


Figura 3.3:1 - V_a : Tensión de red V_a . V_{ta} : Señal tras pasar por los interruptores de potencia.

Las ecuaciones $(Vt_a(t) = ua \cdot \frac{VDC}{2})$ (3.3:1) – $Vt_c(t) = uc \cdot \frac{VDC}{2}$
 (3.3:3) expresan la función de salida de los interruptores $Vt_{abc}(t)$ correspondiente cada una con cada fase. Observamos que lo causa la forma de onda cuadrada de la (Figura 3.3:1 - V_a : Tensión de red V_a . V_{ta} : Señal tras pasar por los interruptores de potencia.), en la que depende del valor de la señal de control ($u_{abc}(t)$). Este valor es el correspondiente a la señal de conmutación que actúa sobre los interruptores, que debe su origen al control, y que tiene como valores 1 (cuando está activo el interruptor superior) o -1 (cuando lo está el inferior).

$$Vt_a(t) = ua \cdot \frac{VDC}{2} \quad (3.3:1)$$

$$Vt_b(t) = ub \cdot \frac{VDC}{2} \quad (3.3:2)$$

$$Vt_c(t) = uc \cdot \frac{VDC}{2} \quad (3.3:3)$$

3.4 Filtrado

Con el fin de inyectar a la red energía con una calidad adecuada, a la salida del inversor se encuentra un filtro de tercer orden (LCL), encargado de eliminar los ruidos de conmutación del inversor y las señales parásitas que se puedan encontrar acopladas.

Dado que la conmutación del inversor de dos niveles es bastante brusca, produce en la señal modulada de la salida ruidos de conmutación y señales parásitas, que mediante el uso de un filtro serán eliminados para obtener una señal lo más limpia posible.

El filtro empleado en el sistema es de tercer orden (LCL). Su uso permite reducir de una manera muy significativa el rizado de la corriente de salida del inversor.

Tras haber filtrado las señales a la salida del inversor se procede a la inyección de la energía en forma de corriente a la red eléctrica trifásica.

3.5 Red eléctrica

La planta del sistema se define como el elemento físico que se desea controlar. En este estudio la planta constituye una impedancia (Z) de 1.57079 con un ángulo de 30° . Partiendo de esas características y utilizando las siguientes ecuaciones obtenemos un valor resistivo de 1.3603Ω y una impedancia de 2.5mH.

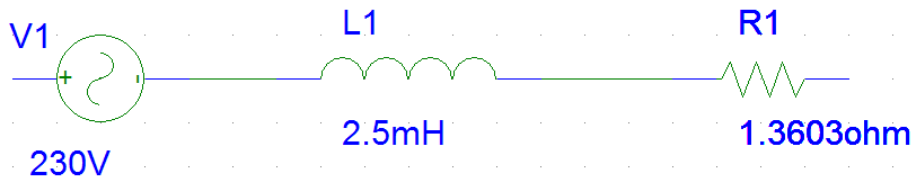


Figura 3.5: Esquema de la red eléctrica

$$x(\text{Ángulo}) = \frac{30^\circ \cdot 2 \cdot \pi}{360} \quad (3.5:1)$$

$$L = \frac{Z \cdot \tan(x)}{\omega \left(\frac{1}{(\tan(x)^2 + 1)^{\frac{1}{2}} + \omega \cdot \tan(x)^2 \cdot \left(\frac{1}{\tan(x)^2 + 1} \right)^{\frac{1}{2}}} \right)} \quad (3.5:2)$$

$$R = \frac{L \cdot \omega}{\tan(x)} \quad (3.5:3)$$

3.6 Señales de puerta y control

El control sensa de forma continua las corrientes y tensiones que proceden del sistema para generar las señales de puerta adecuadas que se encargarán de activar los interruptores (IGBT) del inversor trifásico. Este apartado se explica en el siguiente capítulo con mayor detenimiento.

3.7 Generador de huecos

3.7.1 Definición de sistema homopolar

Un sistema desequilibrado homopolar o de secuencia cero es el que las tensiones o las intensidades de las tres fases están en fase y, por lo tanto, estas tres tensiones o intensidades son iguales, tanto en módulo como en argumento.

Se puede comprobar, entonces, que la suma de las tres tensiones o intensidades del sistema homopolar no es igual a cero. En consecuencia, si las tres tensiones o intensidades del sistema desequilibrado original suman cero, su correspondiente sistema homopolar es nulo (carecen de sistema homopolar).

3.7.2 Características del generador

Para provocar el fallo en la red se ha hecho uso del bloque GWF (Grid with fault)[7] que permite generar huecos que carecen de homopolar.

Mediante una serie de variables se puede ajustar la duración del hueco, la caída de las fases, la separación entre fase y fase y el tipo de hueco. En la Figura 3.7:1 se puede observar los tipos de huecos que se obtienen en función del ángulo insertado en el generador. El tipo A se encuentra en el punto central.

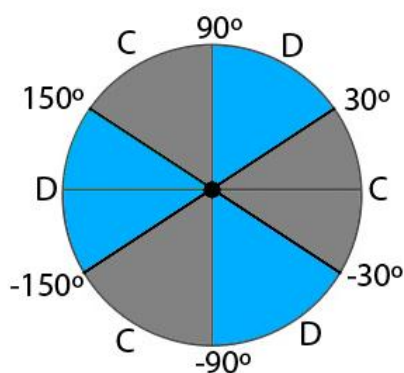


Figura 3.7:1 – Relación ángulos-huecos

3.8 Conclusiones

En este capítulo se han presentado las especificaciones básicas del sistema para accionar el inversor trifásico de dos niveles (VSC) así como la actuación de éste para la transformación e inyección de la energía. El inversor electrónico de potencia se puede controlar con dos métodos distintos: por tensión o por corriente. En este proyecto se trabajará con el método de inyección de corriente, en el que tanto la potencia activa y reactiva son controladas por el ángulo de fase y la amplitud de la corriente de línea del VSC con respecto a la tensión del punto de acoplamiento común. Este método tiene la ventaja que gracias a su esquema el inversor está protegido contra condiciones de sobrecarga.



4 Control del inversor

4.1 Introducción

Es importante la elección de una metodología adecuada de control a la hora de optimizar el funcionamiento del inversor. El sistema de control permite estabilizar el inversor entorno a su punto de operación, garantizando una tensión estable de entrada y unas formas de onda adecuadas en la salida.

El inversor empleado funciona con el control en modo corriente, que permite controlar las potencias activa y reactiva entregadas a la red eléctrica. Este tipo de control toma una muestra de las corrientes de línea $I_{abc}(t)$ y también toma una muestra de las tensiones de red $V_{abc}(t)$. Con el sensado de las tensiones se obtienen las corrientes de referencia, para así, realizar una comparación de corrientes (Figura 4.1:1 - Sistema de control creado en Matlab), entre la corriente existente en la salida y la corriente que debería haber. Este tipo de control, es mucho más seguro que un control en modo tensión, ya que generar corrientes de referencia obliga a la salida a seguirlas y actúa como método de protección contra sobre-corrientes.

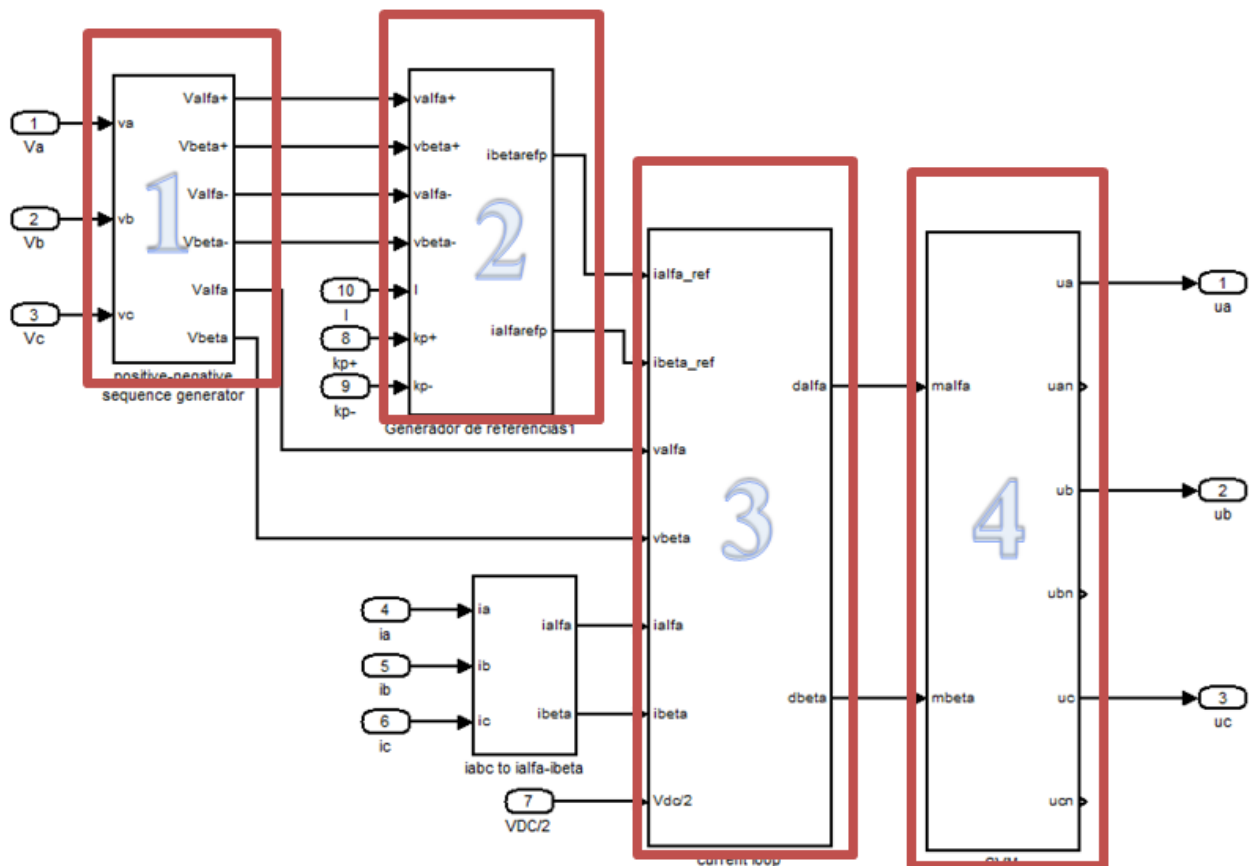


Figura 4.1:1 - Sistema de control creado en Matlab

El sistema se encuentra compuesto por los siguientes bloques:

1. Extractor de secuencias positiva y negativa.
2. Generador de corrientes de referencia.
3. Lazo de corriente.
4. Modulación vectorial (SVM).

4.2 Extractor de secuencias positiva y negativa

En este bloque entran las señales de V_a , V_b y V_c para dividirse en V_α y V_β utilizando la transformada de Clarke (4.2:1). Después estimamos la secuencia positiva y negativa utilizando el bloque SOGI [5] y obtenemos las siguientes señales V_{α^+} , V_{α^-} , V_{β^+} y V_{β^-} . (Figura 4.2:1)

$$V_{\alpha\beta} = TV_{abc} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (4.2:1)$$

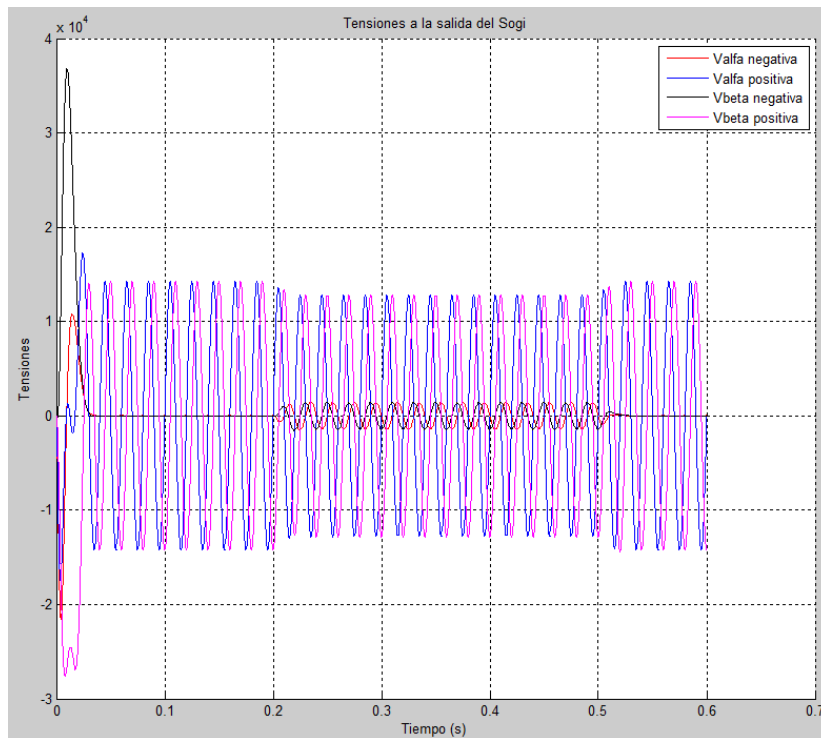


Figura 4.2:1 - V_{α^+} , V_{α^-} , V_{β^+} y V_{β^-}

4.3 Generador de corrientes de referencia.

En el siguiente bloque se han realizado dos vertientes de cálculo con sus respectivas ecuaciones. La diferencia recae en el que el control está realizado por corriente o por potencias.

No se puede realizar por corriente en el control final ya que no se ha logrado una ecuación conjunta que trabaje con la potencia activa y reactiva conjuntamente. Sin embargo para evaluar las tendencias del sistema sí que serán de utilidad ya que todo el control se hace por corriente y la potencia depende de ella eliminando así una variable que simplifica el estudio.

En los siguientes controles vamos a observar las ecuaciones de las corrientes de referencia i_α e i_β que están compuestas cada una de ellas por una parte de potencia activa y otra reactiva tal como muestran las siguientes ecuaciones $i_\alpha = i_{\alpha p} + i_{\alpha q} = i_{\alpha,activa} + i_{\alpha,reactiva}$ (4.3:1) $i_\beta = i_{\beta p} + i_{\beta q} = i_{\beta,activa} + i_{\beta,reactiva}$ (4.3:2).

$$i_{\alpha} = i_{\alpha p} + i_{\alpha q} = i_{\alpha, activa} + i_{\alpha, reactiva} \quad (4.3:1)$$

$$i_{\beta} = i_{\beta p} + i_{\beta q} = i_{\beta, activa} + i_{\beta, reactiva} \quad (4.3:2)$$

4.3.1 Control por corriente

Ecuaciones para la generación de las corrientes de referencia mediante corriente:

$$i_{\alpha p} = \frac{k_p^+ v_{\alpha}^+ + k_p^- v_{\alpha}^-}{[(k_p^+ \cdot V^+)^2 + 2k_p^+ \cdot k_p^- \cdot V^+ \cdot V^- \cos_M + (k_p^- \cdot V^-)^2]^{1/2}} \cdot I_p \quad (4.3:3)$$

$$i_{\beta p} = \frac{k_p^+ v_{\beta}^+ + k_p^- v_{\beta}^-}{[(k_p^+ \cdot V^+)^2 + 2k_p^+ \cdot k_p^- \cdot V^+ \cdot V^- \cos_M + (k_p^- \cdot V^-)^2]^{1/2}} \cdot I_p \quad (4.3:4)$$

$$i_{\alpha q} = \frac{k_q^+ v_{\alpha}^+ + k_q^- v_{\alpha}^-}{[(k_q^+ \cdot V^+)^2 - 2k_q^+ \cdot k_q^- \cdot V^+ \cdot V^- \cos_m + (k_q^- \cdot V^-)^2]^{1/2}} \cdot I_q \quad (4.3:5)$$

$$i_{\beta q} = \frac{-k_q^+ v_{\alpha}^+ + k_q^- v_{\alpha}^-}{[(k_q^+ \cdot V^+)^2 - 2k_q^+ \cdot k_q^- \cdot V^+ \cdot V^- \cos_m + (k_q^- \cdot V^-)^2]^{1/2}} \cdot I_q \quad (4.3:6)$$

$$\cos_M = \max[\cos(\varphi^+ - \varphi^-), \cos(\varphi^+ - \varphi^- + \frac{2\pi}{3}), \cos(\varphi^+ - \varphi^- - \frac{2\pi}{3}),] \quad (4.3:7)$$

$$\cos_m = \min[\cos(\varphi^+ - \varphi^-), \cos(\varphi^+ - \varphi^- + \frac{2\pi}{3}), \cos(\varphi^+ - \varphi^- - \frac{2\pi}{3}),] \quad (4.3:8)$$

4.3.2 Control por potencia

Ecuaciones para la generación de las corrientes de referencia mediante potencia Activa (P) y reactiva (Q):

$$i_{\alpha, act} = \frac{2}{3} \cdot \frac{k_p v_{\alpha}^+ + (1-k_p) v_{\alpha}^-}{k_p ((v_{\alpha}^+)^2 + (v_{\beta}^+)^2) + (1-k_p) ((v_{\alpha}^-)^2 + (v_{\beta}^-)^2)} \cdot P \quad (4.3:9)$$

$$i_{\beta, act} = \frac{2}{3} \cdot \frac{k_p v_{\beta}^+ + (1-k_p) v_{\beta}^-}{k_p ((v_{\alpha}^+)^2 + (v_{\beta}^+)^2) + (1-k_p) ((v_{\alpha}^-)^2 + (v_{\beta}^-)^2)} \cdot P \quad (4.3:10)$$

$$i_{\alpha,react} = \frac{2}{3} \cdot \frac{k_q v_{\beta}^+ + (1-k_q) v_{\beta}^-}{k_q ((v_{\alpha}^+)^2 + (v_{\beta}^+)^2) + (1-k_q) ((v_{\alpha}^-)^2 + (v_{\beta}^-)^2)} \cdot Q \quad (4.3:11)$$

$$i_{\beta,react} = -\frac{2}{3} \cdot \frac{k_q v_{\alpha}^+ + (1-k_q) v_{\alpha}^-}{k_q ((v_{\alpha}^+)^2 + (v_{\beta}^+)^2) + (1-k_q) ((v_{\alpha}^-)^2 + (v_{\beta}^-)^2)} \cdot Q \quad (4.3:12)$$

En las ecuaciones además de las señales V_{α}^+ , V_{α}^- , V_{β}^+ y V_{β}^- obtenidas anteriormente, tenemos los parámetros k_p , k_q que se pueden modificar entre los valores 0-1 y P, Q. Dónde P corresponde a la potencia activa, Q a la potencia reactiva y S la potencia aparente que tiene un valor de 10KVA. Estas son las variables con las cuales jugaremos para inyectar potencia siguiendo la siguiente relación y las estrategias que se explican en capítulos posteriores:

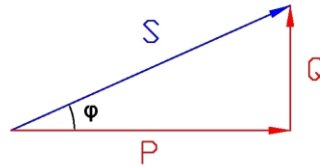


Figura 4.3:1- Triángulo de potencias

Combinando las variables anteriores podemos elevar más o menos la tensión y a la salida de este bloque obtenemos las corrientes I_{α} e I_{β} como se muestra en la Figura 4.3:2.

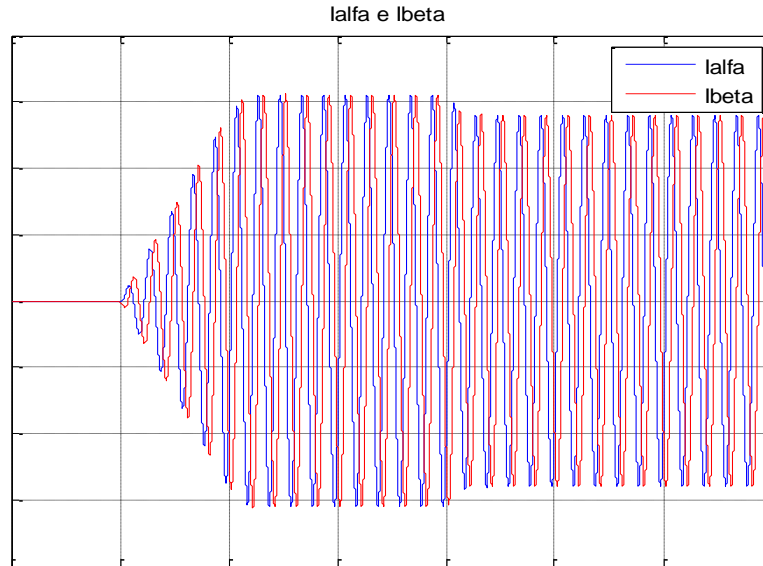


Figura 4.3:2 - Corrientes I_{α} , I_{β}

4.4 Modulación vectorial

A la puerta de los interruptores IGBT deberá llegar una señal cuadrada con valores de 0 ó 1.

Las señales de modulación $m_{\alpha\beta}(t)$ se entregan al SVM [6] el cual generará seis señales cuadradas $U_{\alpha 1}, U_{\alpha 2}, U_{\beta 1}, U_{\beta 2}, U_{c1}, U_{c2}$, dos por cada fase. Estas señales serán las que se

entreguen a la puerta de los interruptores de potencia, para que estos actúen. Las señales $U_{abc}1(t)$ (**Error! No se encuentra el origen de la referencia.**) activaran los interruptores superiores, y las señales $U_{abc}2(t)$ serán la inversa de las señales anteriores y las encargadas de activar los interruptores inferiores (Figura 4.4:2). De esta manera garantizando que los interruptores de cada fase no se encuentran en el mismo estado (conducción o corte) simultáneamente.

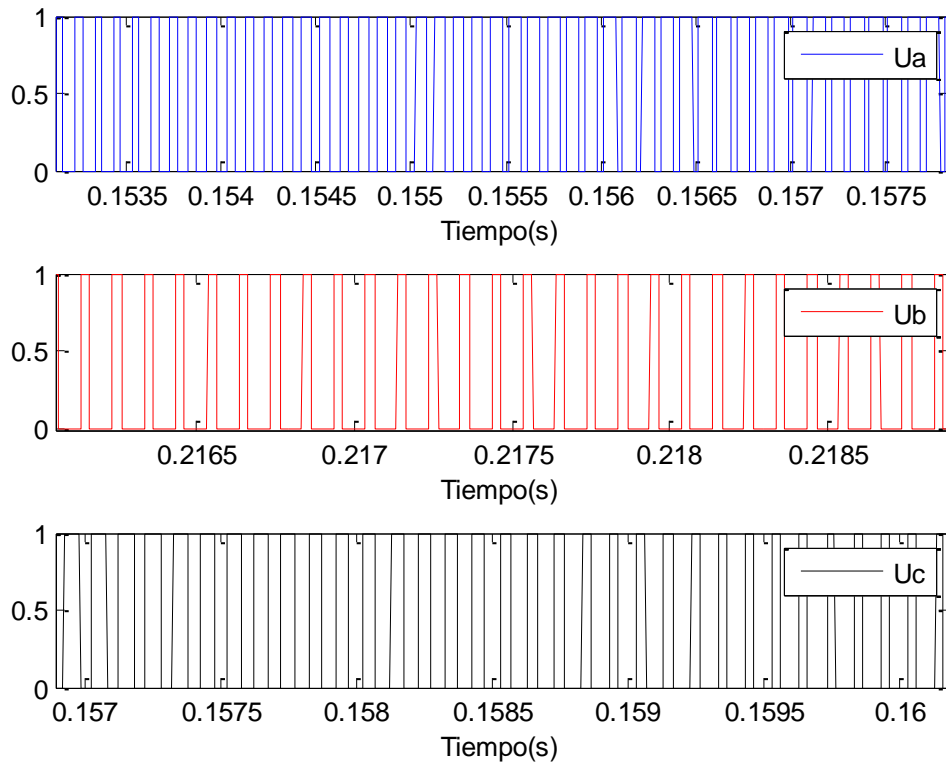


Figura 4.4:1- Señales de salida al Space Vector Modulation de la rama superior.

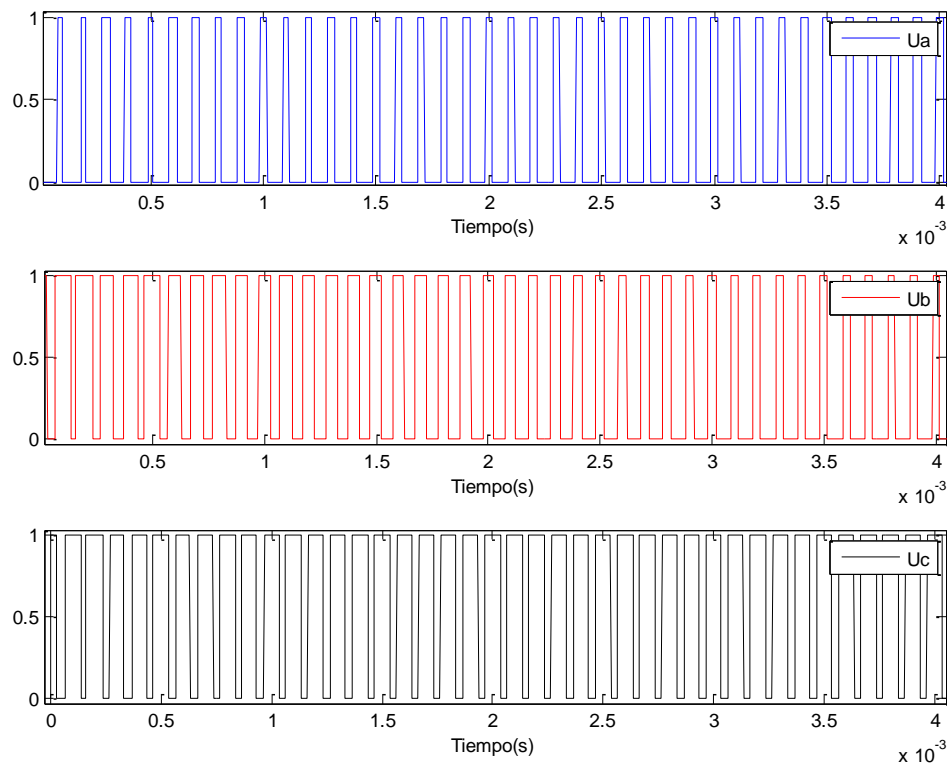


Figura 4.4:2- Señales de salida al Space Vector Modulation de la rama inferior.

4.5 Conclusiones

En este capítulo se ha presentado el control correspondiente del inversor trifásico de dos niveles (VSC). El lazo de control se consigue mediante el método de transformación de las variables abc al marco $\alpha\beta$ (transformada de Clarke), así como la extracción de las secuencias positivas y negativas mediante el *SOGI*. Con esto se pueden generar corrientes de referencia y hacer un lazo de corriente para conseguir la compensación de la señal de error, dando lugar a unas señales moduladoras que regirán el comportamiento de los interruptores de potencia.

5 Comportamiento estático del sistema

5.1 Introducción

Como hemos visto en el apartado “Generador de corrientes de referencia.”, existen dos métodos para realizar el control del inversor y gestionar las 6 variables existentes en el sistema que son Potencia activa (P), Potencia reactiva (Q), Modificadores de potencia activa (Kp^+ y Kp^-) y por último Modificadores de potencia reactiva (Kq^+ y Kq^-).

Por simplificación los 4 modificadores pueden ser gestionados como 2 como se observa en las ecuaciones (5.1:1 y (5.1:2. Así se consigue reducir el número de variables del sistema a 4

$$Kp^+ = Kp \quad Kp^- = (1 - Kp) \quad (5.1:1)$$

$$Kq^+ = Kq \quad Kq^- = (1 - Kq) \quad (5.1:2)$$

Los modificadores Kp y Kq pueden variar entre 0 - 1 inclusivos y se rigen por las ecuaciones anteriores de manera que podemos controlar la cantidad de potencia activa y reactiva por secuencia positiva (V^+) y negativa V^- para eliminar esta última y solventar un hueco.

Kp	Kq	Kp^+	Kp^-	Kq^+	Kq^-
1	1	1	0	1	0
0	0	0	1	0	1
0.3	0.3	0.3	0.7	0.3	0.7
1	0.3	1	0	0.3	0.7

Tabla 5-1 - Ejemplos de inyección Kp y Kq

Las potencias activa y reactiva se mueven desde los valores 0 a 10000Var siguiendo el triángulo de potencias Figura 4.3:1- Triángulo de potenciasFigura 4.3:1 que se rige por la siguiente ecuación:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (5.1:3)$$

Para estudiar el comportamiento estático del sistema se ha utilizado el control por corriente. Este sistema no nos permite gestionar las 4 variables a la vez y por falta de implementación no puede ser utilizado en la solución final. Sin embargo en este punto del estudio resulta muy útil ya que podemos estudiar de forma aislada ambas inyecciones P y Q con sus respectivos modificadores.

Lo que se pretende en este apartado es comprobar las tendencias que tienen las variables en el sistema para poder hacer más tarde un algoritmo que gestione el generador de corriente y le indique los valores adecuados para cada caso.

Este estudio se realiza con un ángulo de 30° (planta mayormente resistiva). Ya que se han realizado estudios anteriores con ángulos de 90° (planta completamente inductiva) y con 0° (planta completamente resistiva). Se ha decidido repetir su estudio para comprobar, conociendo de antemano los resultados, la fiabilidad del control y así hacer un buen estudio de 30° .

En los siguientes apartados se observarán las distintas gráficas realizadas para observar las tendencias de los modificadores K_p y K_q en función de la cantidad de potencia P y Q inyectadas respectivamente.

A continuación de las gráficas se hallan unas tablas que recogen las conclusiones.

5.2 Estudio de planta a 90°

5.2.1 Inyección de potencia activa

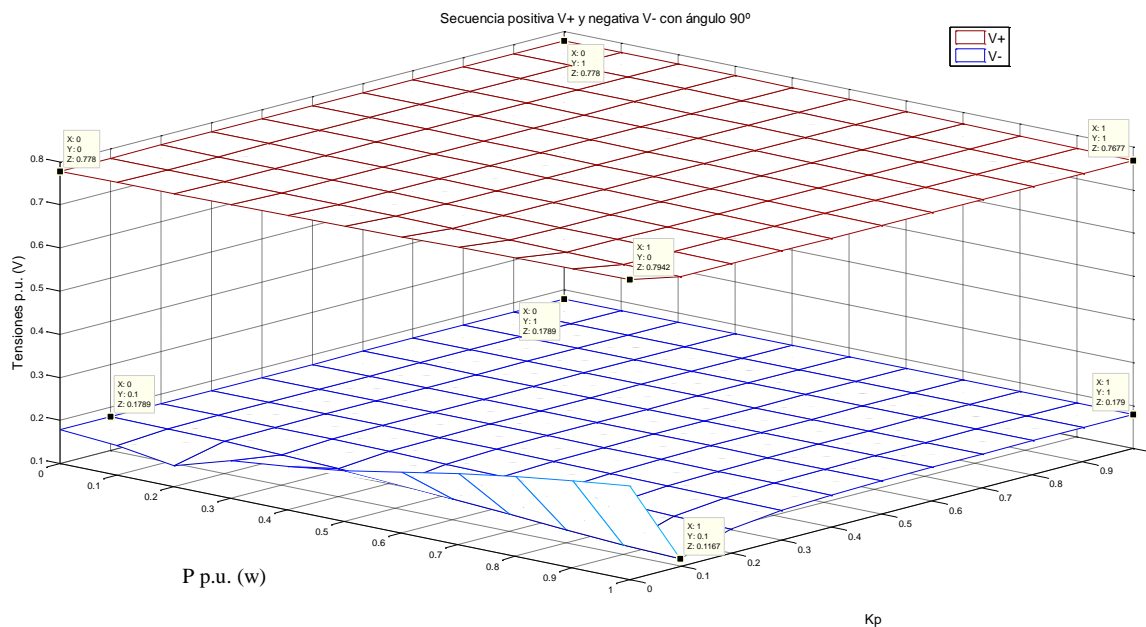


Figura 5.2:1 - Secuencia positiva V+ y negativa V- con ángulo 90° (Inyección de P)

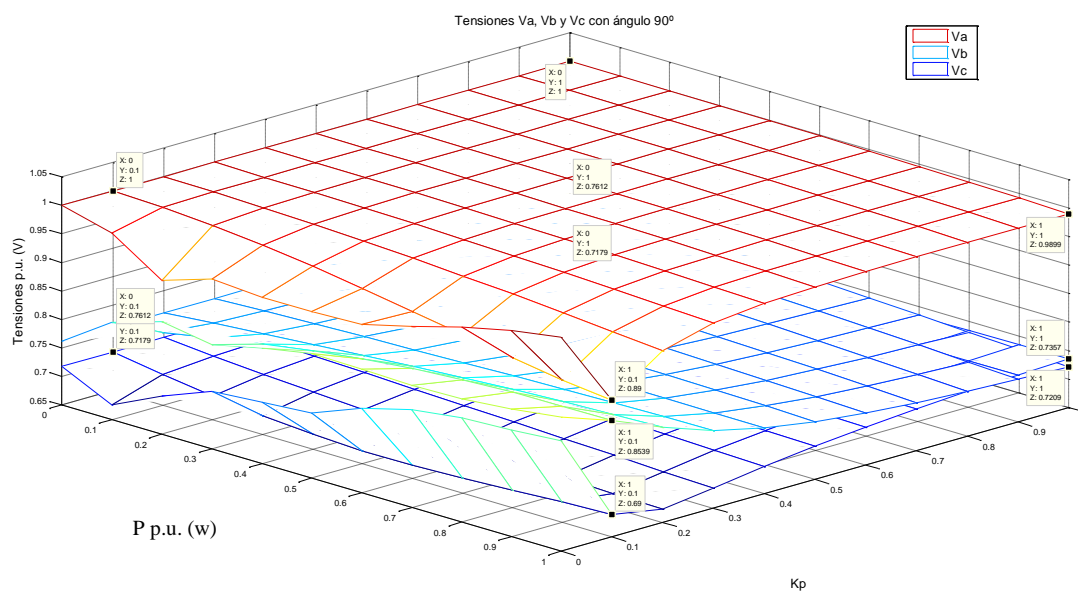


Figura 5.2:2 - Tensiones Va, Vb, y Vc con ángulo 90° (Inyección de P)

Como se puede observar en la figura Figura 5.2:2 los valores tanto por secuencia positiva como negativa se han tomado en $K_p=0.1$ ya que después el sistema al acercarse a 0 se inestabiliza.

90°	V^+	V^-
$K_p=1$	=	=
$K_p=0$	=	↓

Tabla 5-2 - Conclusiones de inyección de potencia activa en 90°

5.2.2 Inyección de potencia reactiva

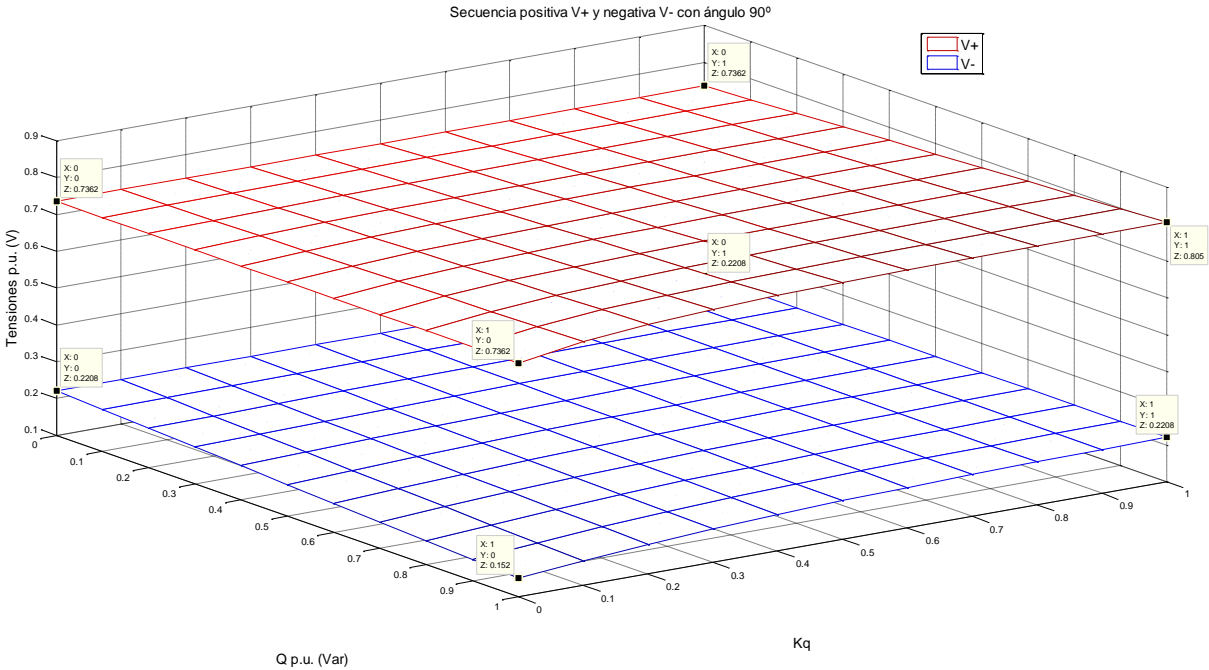


Figura 5.2:3 - Secuencia positiva V+ y negativa V- con ángulo 90° (Inyección de Q)

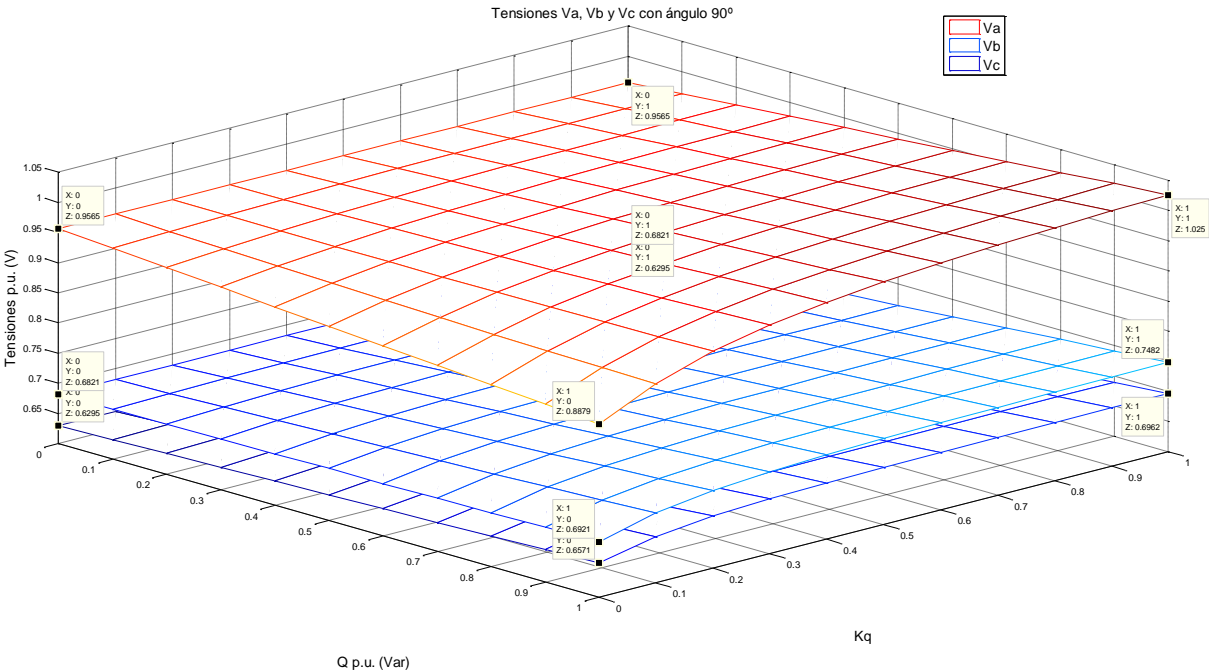


Figura 5.2:4 - Tensiones Va, Vb, y Vc con ángulo 90° (Inyección de Q)

90°	V ⁺	V ⁻
Kq=1	↑	=

$K_q=0$	=	↓
---------	---	---

Tabla 5-3 - Conclusiones de inyección de potencia reactiva en 90°

5.3 Estudio de planta a 0°

5.3.1 Inyección de potencia activa

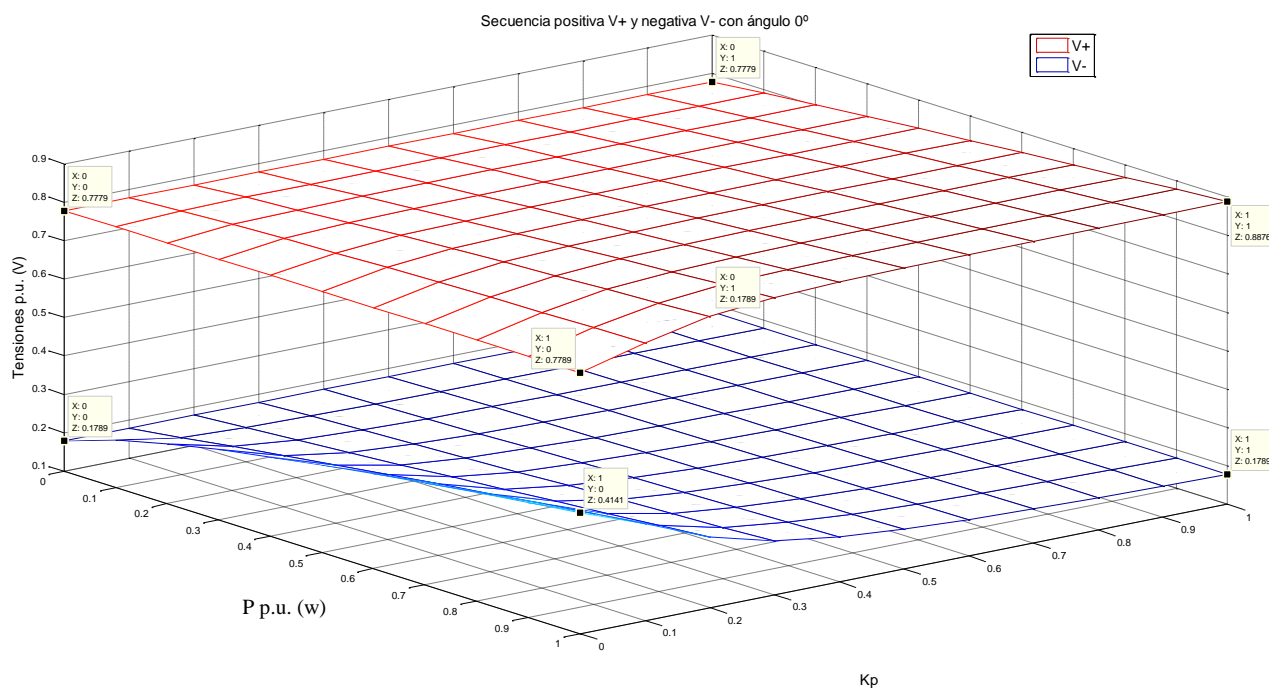


Figura 5.3:1 - Secuencia positiva V+ y negativa V- con ángulo 0° (Inyección de P)

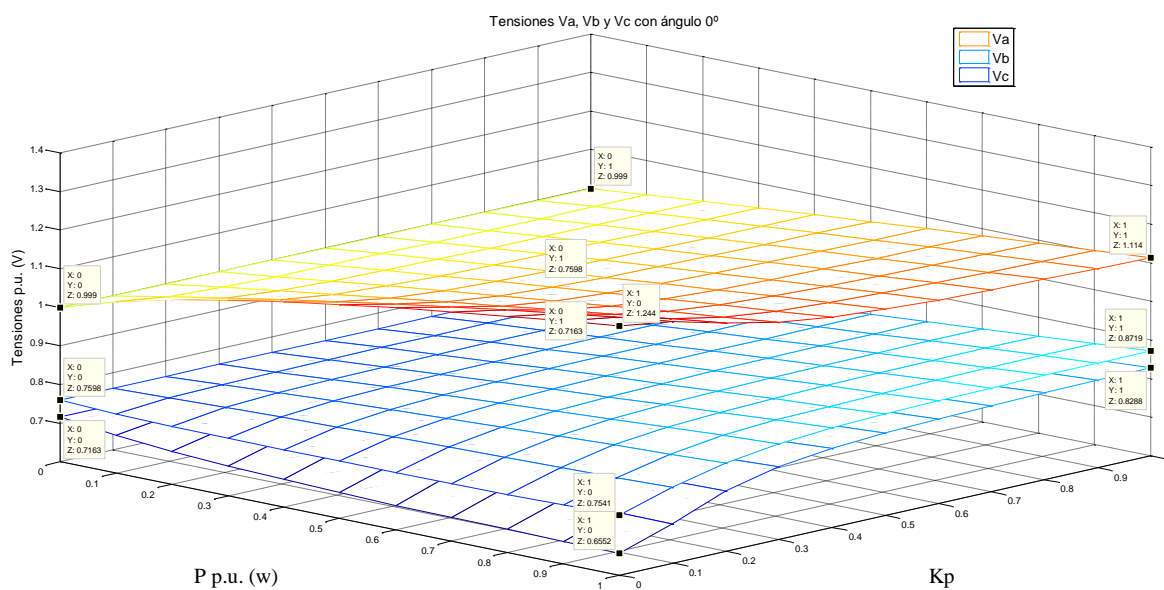


Figura 5.3:2 - Tensiones Va, Vb, y Vc con ángulo 0° (Inyección de P)

0°	V+	V-
-----------	----	----

$K_p=1$	↑	=
$K_p=0$	=	↑

Tabla 5-4 - Conclusiones de inyección de potencia activa en 0°

5.3.2 Inyección de potencia reactiva

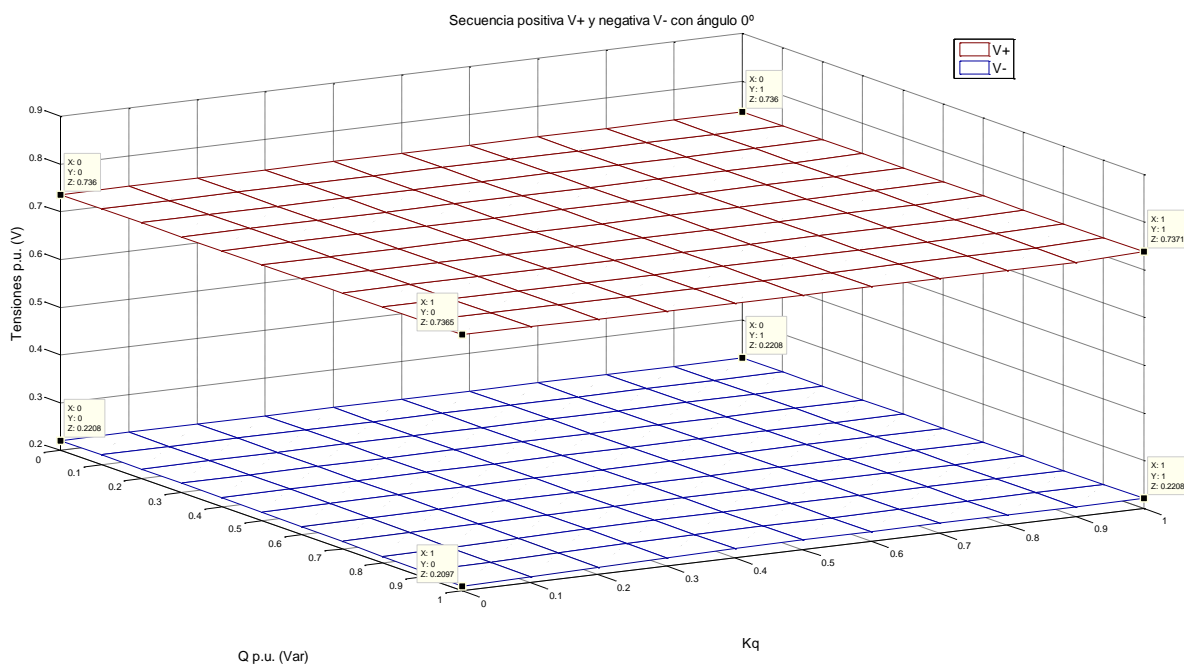


Figura 5.3:3 - Secuencia positiva V+ y negativa V- con ángulo 0° (Inyección de Q)

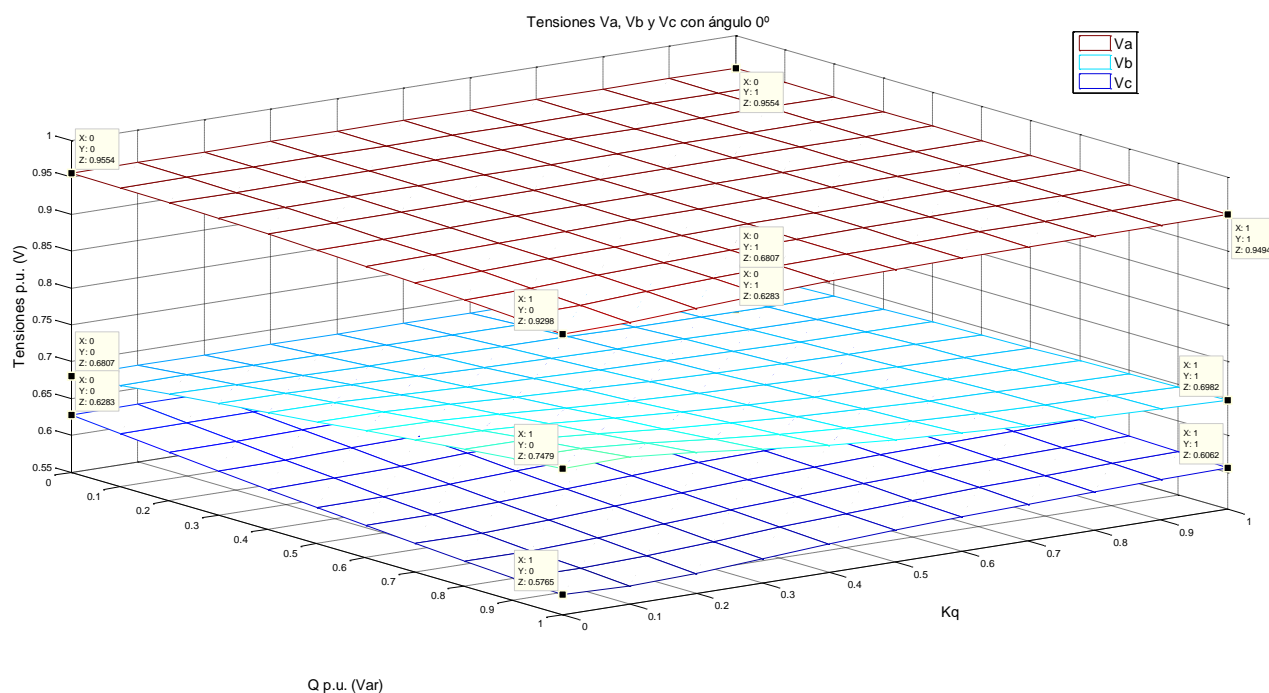


Figura 5.3:4 - Tensiones Va, Vb, y Vc con ángulo 0° (Inyección de Q)

0°	V^+	V^-
$K_q=1$	↑	=
$K_q=0$	=	↓

Tabla 5-5 - Conclusiones de inyección de potencia reactiva en 0°

5.4 Estudio de planta a 30°

5.4.1 Inyección de potencia activa

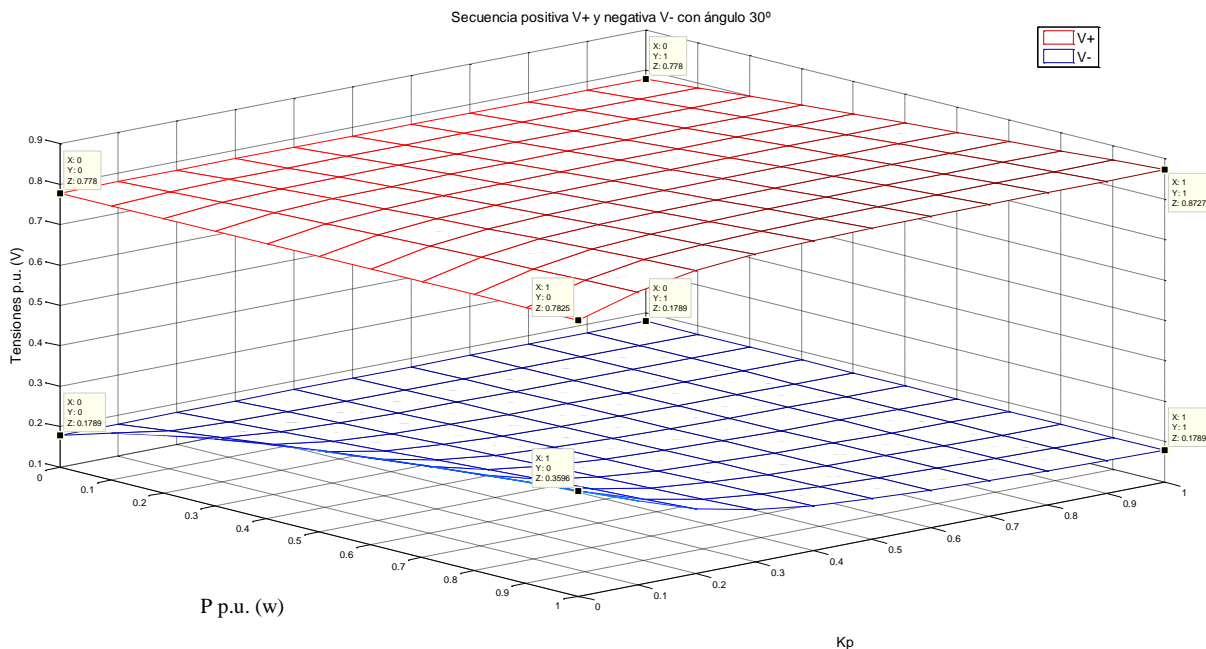


Figura 5.4:1 - Secuencia positiva V+ y negativa V- con ángulo 30° (Inyección de P)

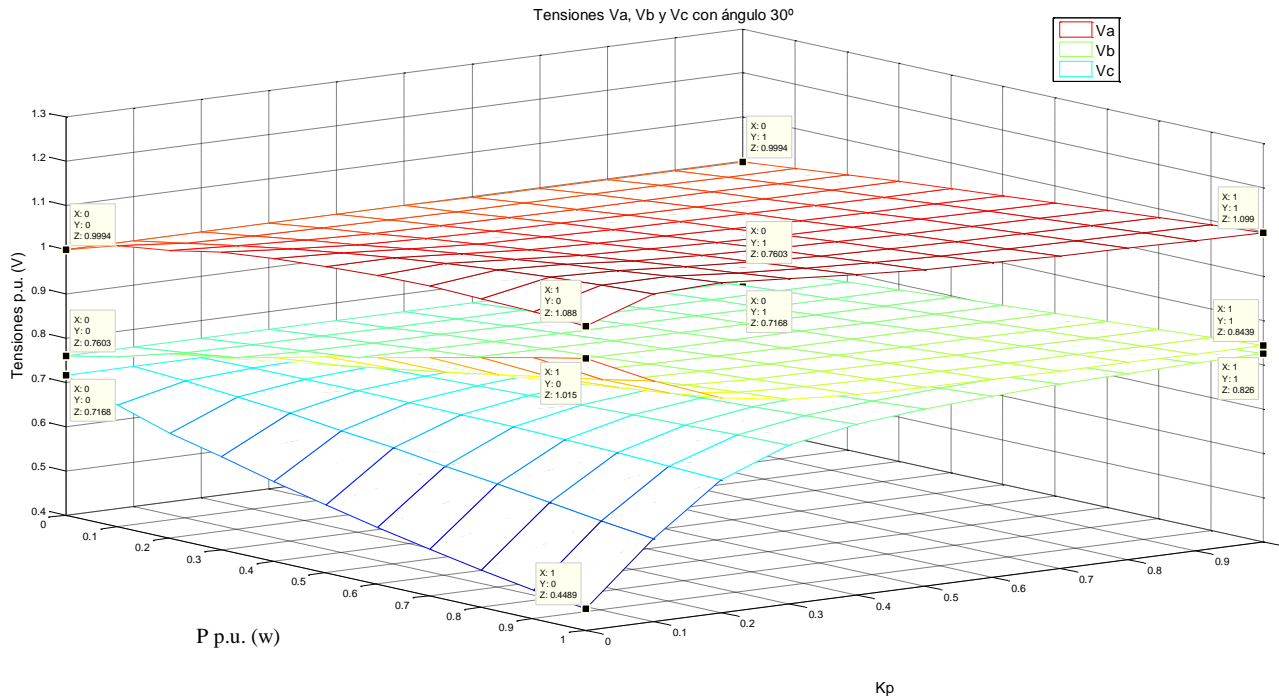


Figura 5.4:2 - Tensiones Va, Vb, y Vc con ángulo 30° (Inyección de P)

30°	V ⁺	V ⁻
K _p =1	↑	=
K _p =0	=	↑

Tabla 5-6 - Conclusiones de inyección de potencia activa en 30°

5.4.2 Inyección de potencia reactiva

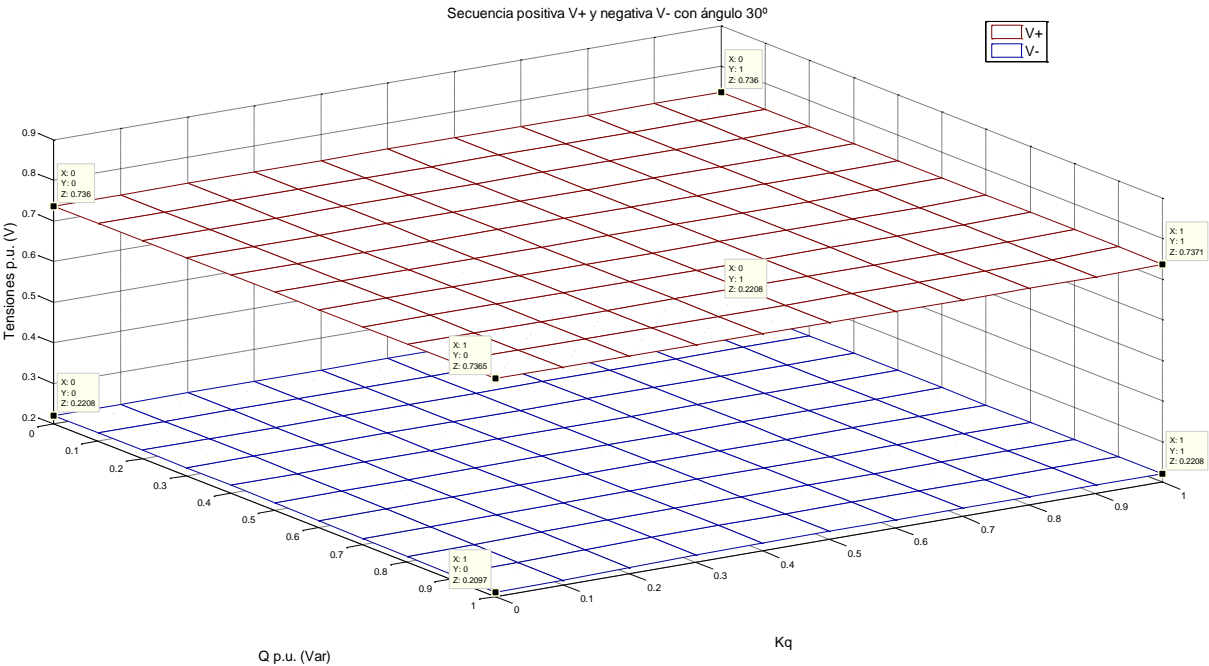


Figura 5.4:3 - Secuencia positiva V+ y negativa V- con ángulo 30° (Inyección de Q)

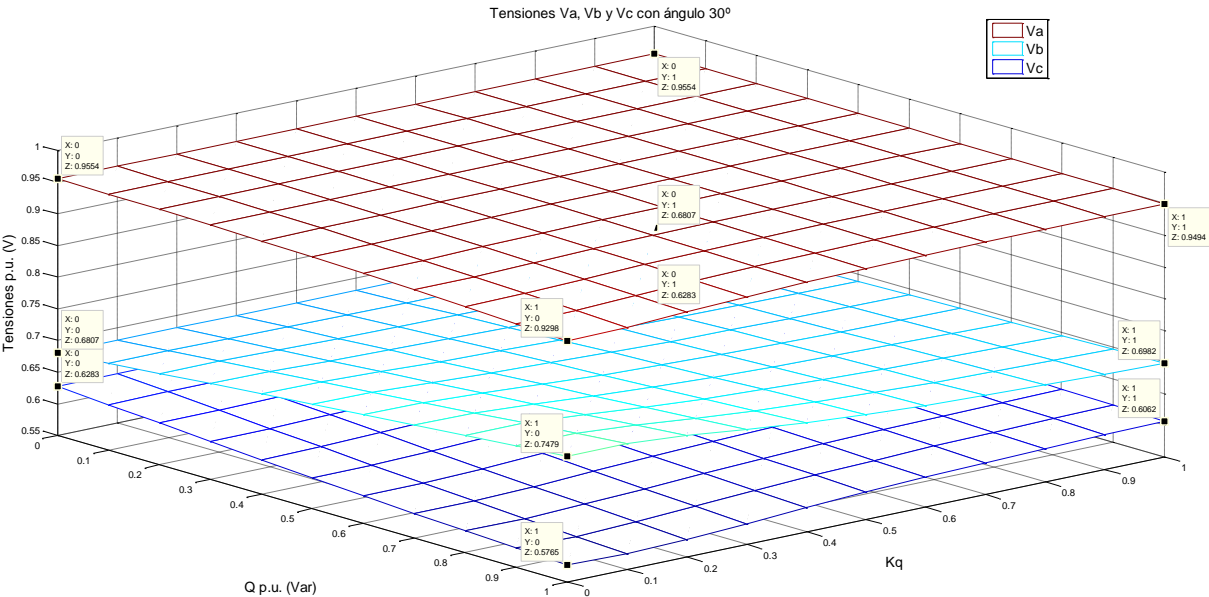


Figura 5.4:4 - Tensiones Va, Vb, y Vc con ángulo 30° (Inyección de Q)

30°	V ⁺	V ⁻
Kq=1	↑	=

$K_q=0$	=	↓
---------	---	---

Tabla 5-7 - Conclusiones de inyección de potencia reactiva en 30°

5.5 Conclusiones

90°	V^+	V^-	90°	V^+	V^-
$K_p=1$	=	=	$K_q=1$	↑↑↑	=
$K_p=0$	=	≈	$K_q=0$	=	↓↓↓

0°	V^+	V^-	0°	V^+	V^-
$K_p=1$	↑↑↑	=	$K_q=1$	≈	=
$K_p=0$	=	↑↑↑	$K_q=0$	=	≈

30°	V^+	V^-	30°	V^+	V^-
$K_p=1$	↑ ↑	=	$K_q=1$	≈	=
$K_p=0$	=	↑ ↑	$K_q=0$	=	≈

Tabla 5-8 - Conclusiones finales de inyección de potencia

Generalizando podemos observar que por secuencia positiva (V^+) y cuando $K_p=1$ la tensión tiende a subir mientras que cuando $K_p=0$ se mantiene estable en todas las pruebas.

Sin embargo por secuencia negativa V^- los resultados son inversos. Cuando $K_p=1$ la tensión se mantiene. En cambio, al ir disminuyendo K_p la tensión también lo hace.

Si observamos todas las tensiones cuando la potencia se encuentra en su mayor valor (1p.u.) y tanto K_p como K_q se encuentran a 0 p.u. se aprecia lo siguiente:

- En 90° bajan las tensiones tanto si la inyección es por activa como por reactiva (Figura 5.2:2 y Figura 5.2:4 respectivamente).
- En 0° inyectando activa se separan las fases mientras que por reactiva no hay ninguna tendencia destacable (Figura 5.3:2 y Figura 5.3:4 respectivamente).
- En 30° si inyectamos potencia activa las fases V_a y V_b se juntan a la vez que se aleja de ellas V_c . Por reactiva ocurre igual pero el efecto es ínfimo debido a que nos encontramos cerca de los 0° y el sistema es resistivo en mayor medida (Figura 5.4:2 y Figura 5.4:4 respectivamente).

Por otro lado si observamos a máxima potencia y K_p - K_q también se encuentran a su mayor valor los efectos son mucho más suavizados.

Para finalizar las conclusiones, considero que la metodología a utilizar no es general, sino que va en función de la planta a tratar. Sin embargo para obtener un aprovechamiento óptimo de la inyección hay que disminuir los modificadores K_p y K_q hasta el valor adecuado ya que manteniéndolos a 1 p.u. el efecto es mínimo.

Haciendo un buen uso de estos modificadores se puede reducir drásticamente tanto la potencia a inyectar en el sistema cómo la corriente que va ligada a ella.



6 Estrategias de inyección de potencia durante huecos de tensión

6.1 Introducción

En este apartado se muestran diferentes estrategias para solventar los fallos de red basadas en la inyección de potencia activa y reactiva.

En condiciones normales de la red, los inversores trifásicos regulan la potencia activa que inyectan a la red. Cuando la red falla, el sistema de control puede mitigar los efectos del hueco inyectando potencia activa y reactiva en forma de corriente para dar soporte a la tensión de la red manteniendo siempre el triángulo de potencias del capítulo 4 (Figura 4.3:1).

6.2 Inyección de potencia en una planta de 30°

Cuando la red tiene un comportamiento inductivo, la inyección de potencia reactiva tiene un efecto notorio. En el caso de la inyección de potencia activa sin embargo el efecto que se produce en las tensiones de red es muy inferior. La inyección de potencia activa se puede hacer de dos formas igual que la reactiva pero en este caso al tratarse de una red con un comportamiento mayormente resistivo (planta de 30°) sí que tiene efectos notorios con referencia a las tensiones de la red como observaremos a continuación.

6.3 Inyección de potencia activa

6.3.1 Inyección de potencia activa por secuencia positiva

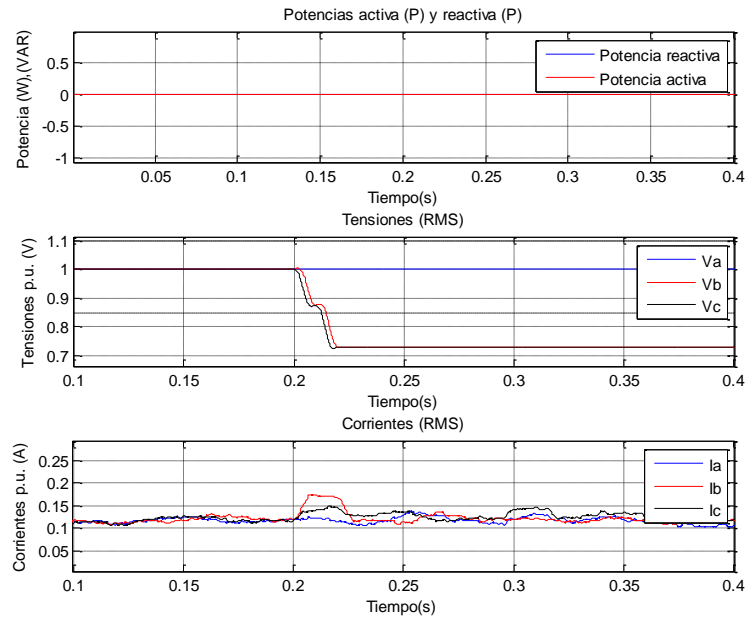


Figura 6.3:1 - Estado de la red sin inyección

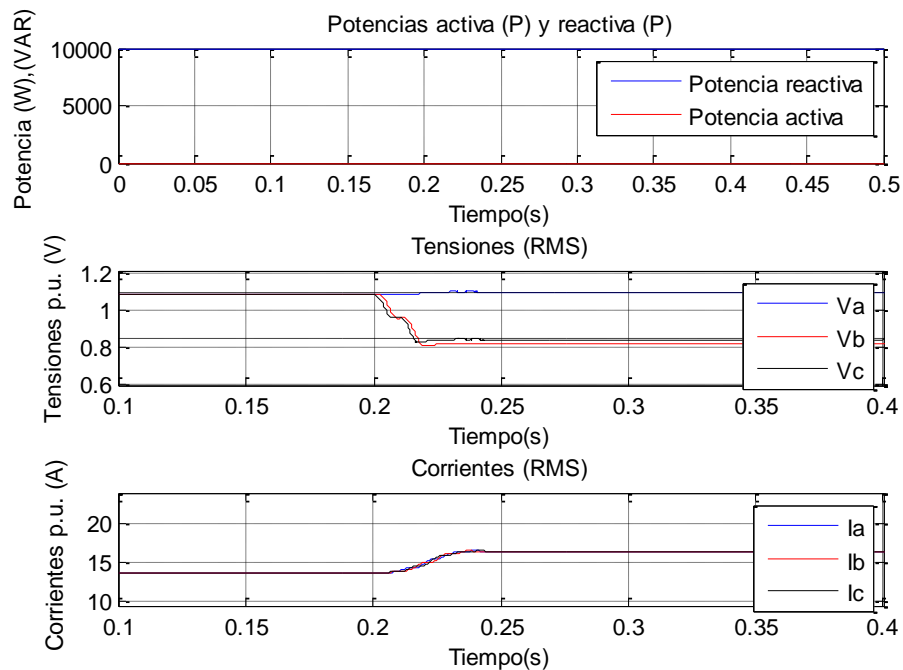


Figura 6.3:2 - Inyección de potencia activa por secuencia positiva

Al inyectar potencia activa por secuencia positiva se consigue elevar todas las fases con un consumo de corriente ínfimo. Esta inyección es la más adecuada en plantas resistivas.

6.3.2 Inyección de potencia activa por secuencia negativa

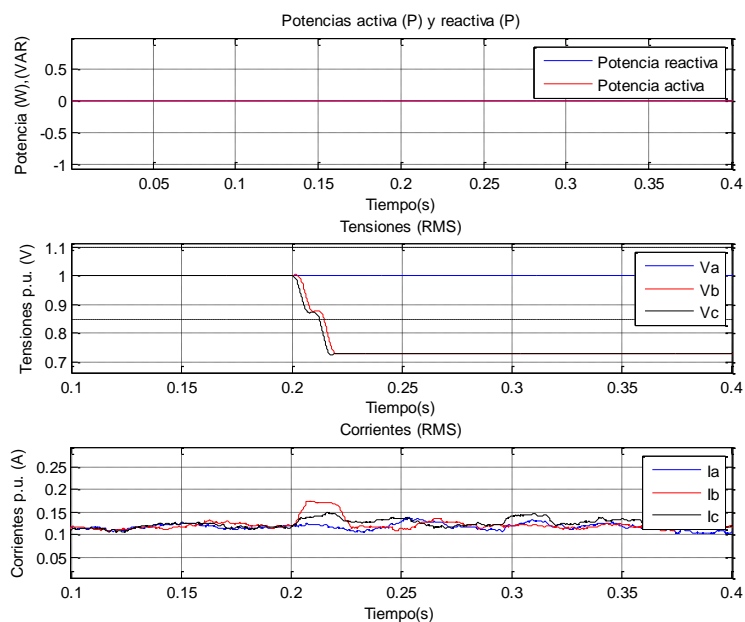


Figura 6.3:3 - Estado de la red sin inyección

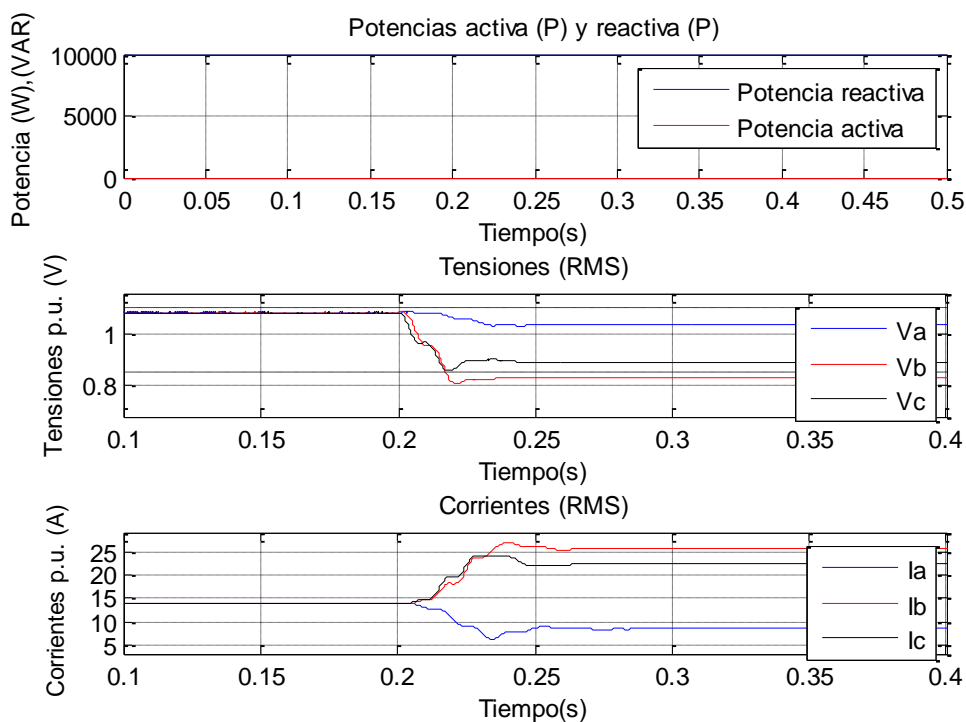


Figura 6.3:4 - Inyección de potencia activa por secuencia negativa

Pese a que genera un gasto de corriente importante junta bastante las tres fases. Era de esperar ya que el sistema es en gran medida resistivo.

6.4 Inyección de potencia reactiva

6.4.1 Inyección de potencia reactiva por secuencia positiva

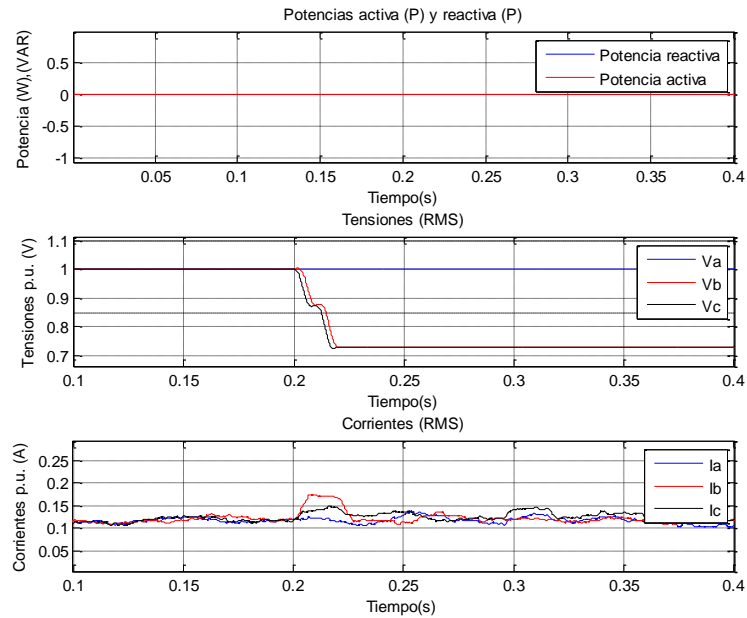


Figura 6.4:1 - Estado de la red sin inyección

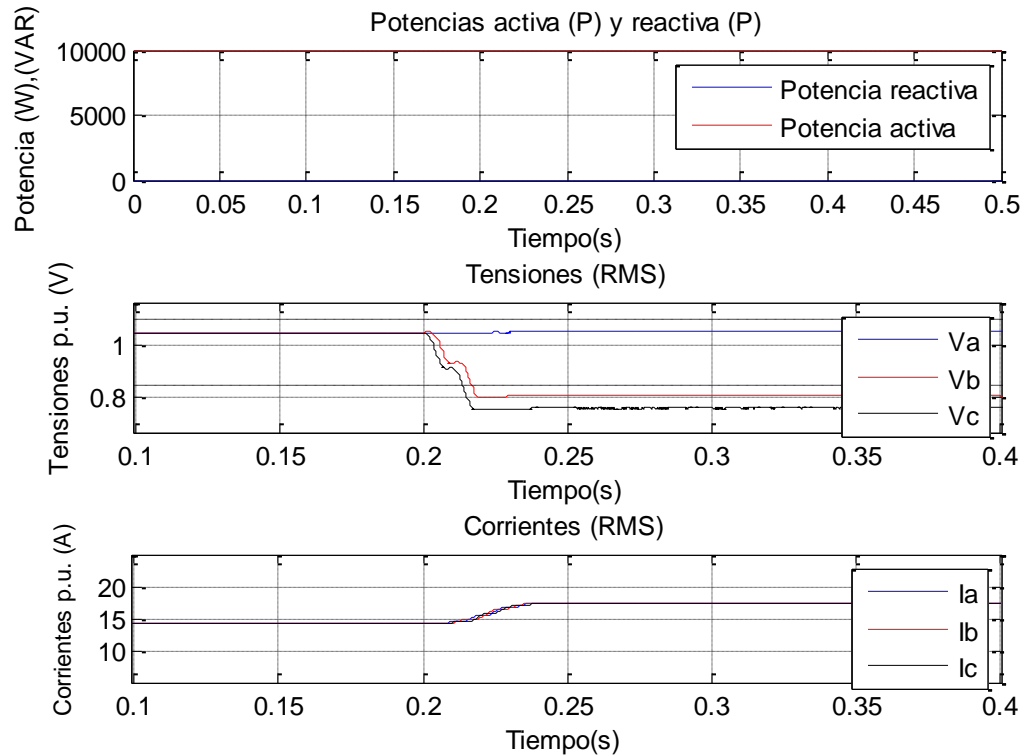


Figura 6.4:2 - Inyección de potencia reactiva por secuencia positiva

La inyección de reactiva por secuencia positiva tiene un efecto casi nulo.

6.4.2 Inyección de potencia reactiva por secuencia negativa

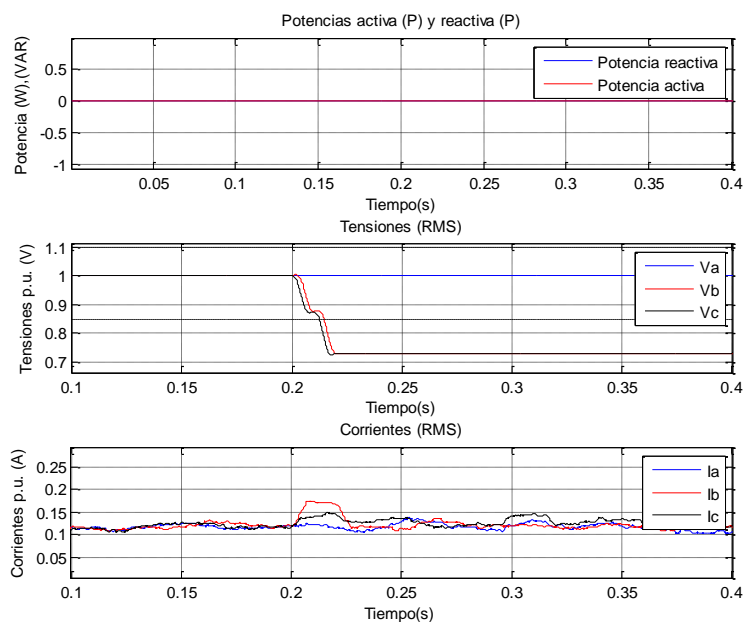


Figura 6.4.3 - Estado de la red sin inyección

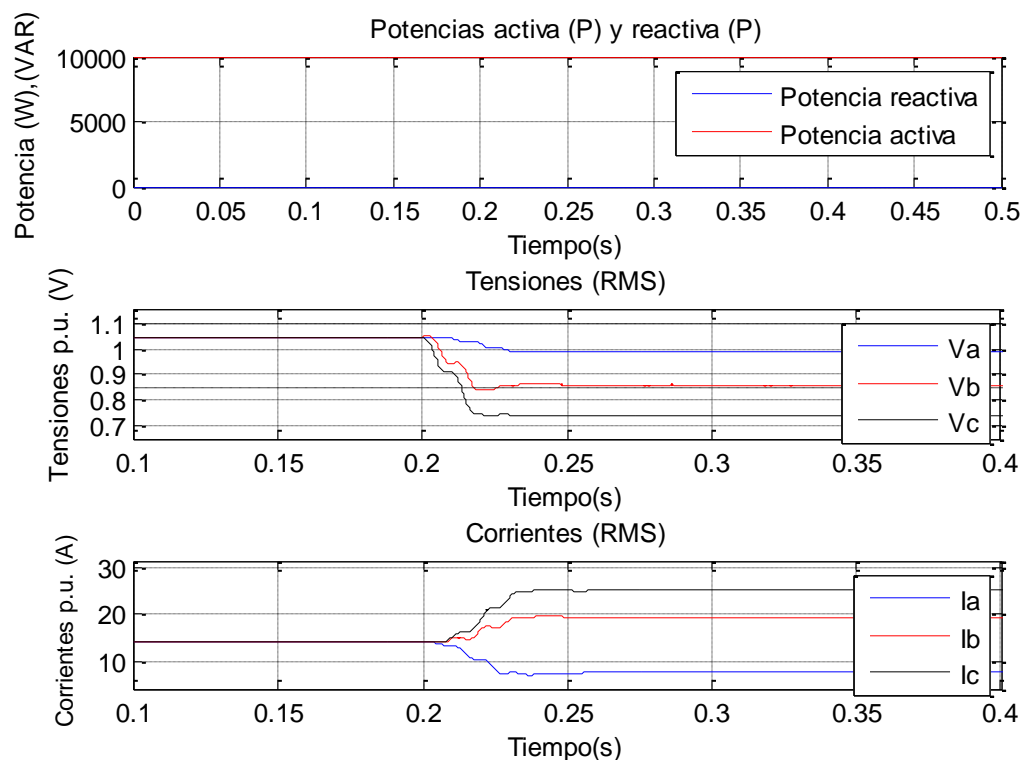


Figura 6.4.4 - Inyección de potencia reactiva por secuencia negativa

No es conveniente inyectar potencia reactiva por secuencia negativa ya que como se aprecia en la ilustración junta las tensiones Va y Vb sin embargo separa Vc consumiendo con todo ello mucha corriente.

6.5 Inyección combinada de potencias (P, Q) y secuencias (V_+ , V_-)

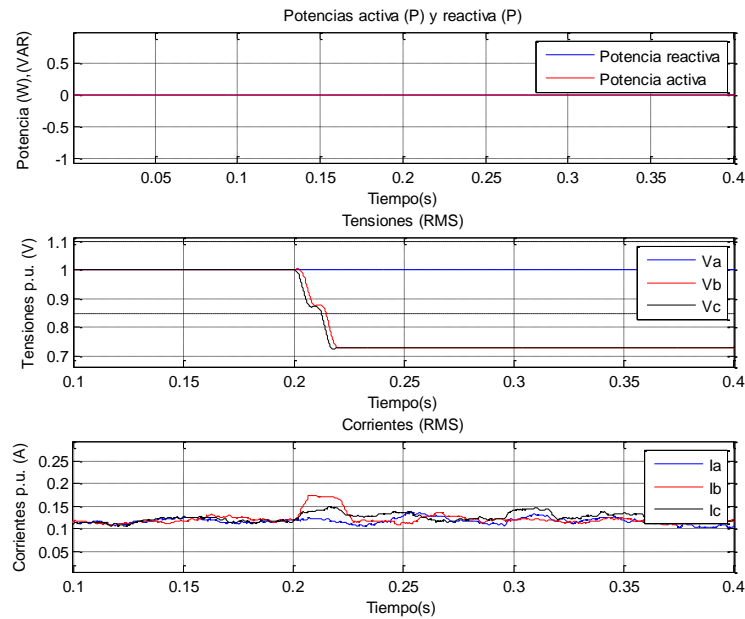


Figura 6.5:1 - Estado de la red sin inyección

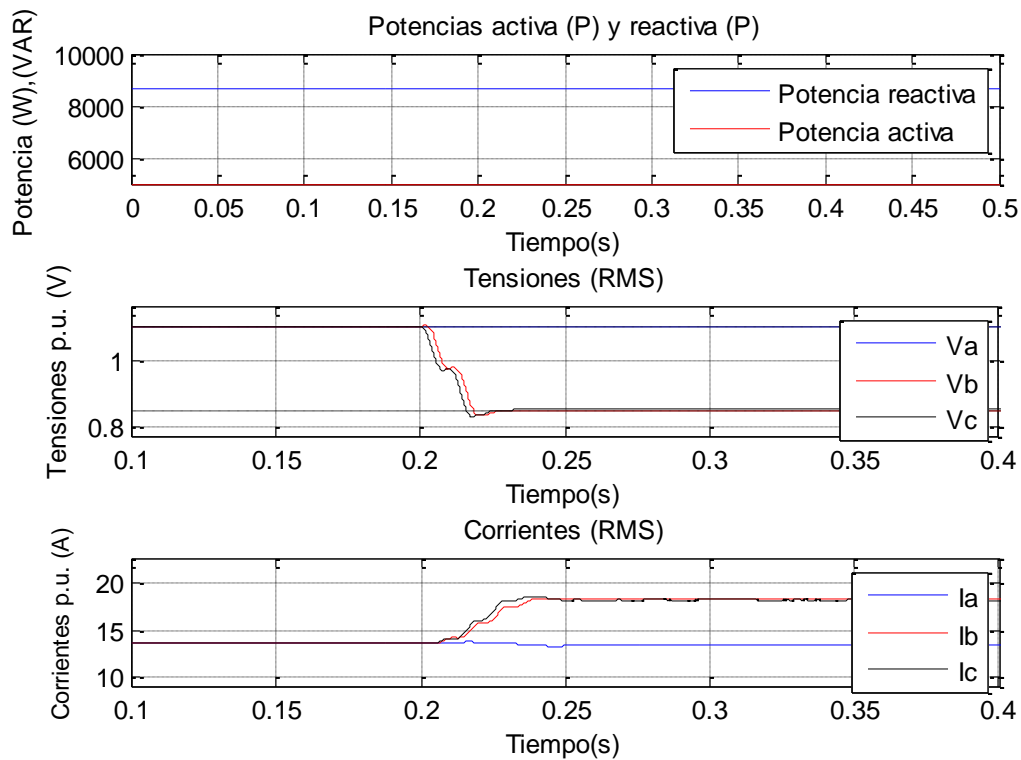


Figura 6.5:2 - Inyección combinada de potencias (P, Q) y secuencias (V_+ , V_-)

Al combinar las inyecciones se ha solventado el hueco de la forma más óptima posible. Entregando en todo momento una cantidad elevada de potencia activa y un consumo de corriente moderado.

6.6 Conclusiones

Como era de esperar al tratarse de una planta mayormente resistiva la mejor inyección es la de potencia activa. Por secuencia positiva el gasto de corriente es ínfimo y levanta las 3 fases y si el objetivo es juntar inyectar por secuencia negativa es la mejor opción.

Aun viendo que la potencia reactiva no tiene tanto peso es importante tenerla en cuenta ya que se ha observado que la mejor inyección es la que combina potencia activa y reactiva por secuencia positiva y negativa.



7 Nuevo algoritmo de control

7.1 Introducción

Una vez realizados los estudios del comportamiento de las variables de entorno (capítulo 5) y el efecto que tienen estas en el sistema una vez actúan (capítulo 6).

El siguiente paso es crear el algoritmo que permita solventar huecos de tensión de la forma más eficiente posible. La eficiencia consta de dos normas, el mínimo consumo de corriente y la mayor entrega de potencia activa durante el transcurso del fallo. El algoritmo creado actúa sobre el sistema de control, haciendo que este actúe para solventar el problema, en la Figura 7.1:1 se muestra la situación del sistema de control avanzado dentro del proceso del sistema. En la Figura 7.1:2 se puede observar la ubicación del algoritmo de control dentro del sistema creado en Matlab que no aparecía en la Figura 4.1:1 - Sistema de control creado en Matlab del capítulo 4.

El algoritmo propuesto identifica la existencia de un problema en la red. Una vez determinado que se ha producido un fallo, lo caracteriza con el fin de determinar cómo actuar. Caracterizado el fallo procede a realizar la inyección de energía con la estrategia adecuada para realizar la ecualización correcta de la tensión de red. Por último se encarga de determinar cuando desaparece el fallo de red y volver al modo de funcionamiento normal del inversor e inyectar toda la potencia activa.

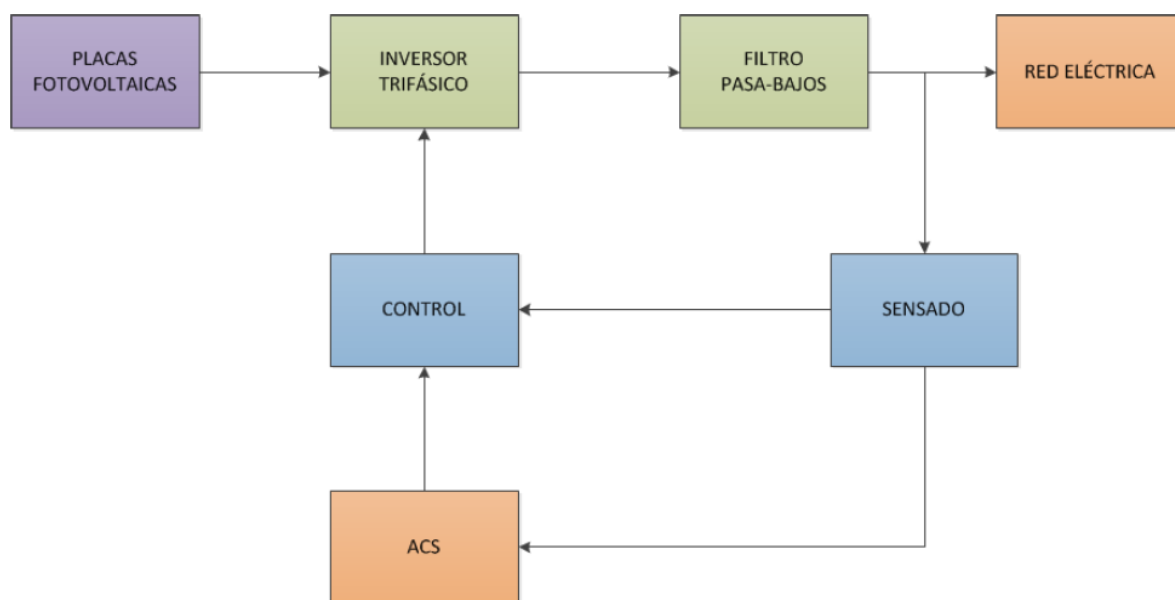


Figura 7.1:1 - Esquema con el sistema de control (Advanced Control System)

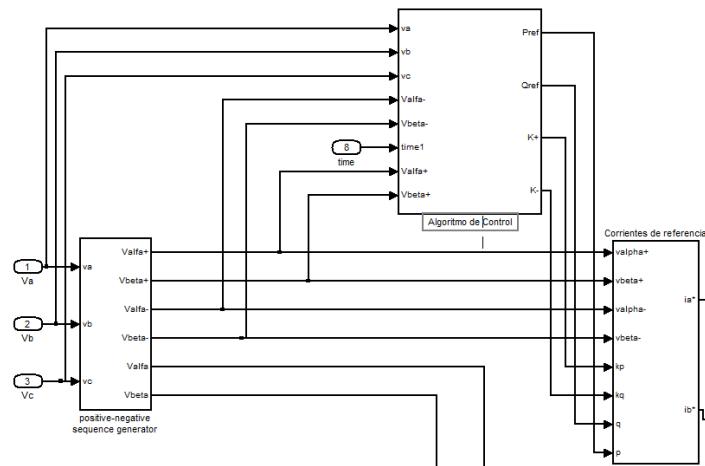


Figura 7.1:2 - Ubicación del algoritmo de control en el sistema creado en Matlab

7.2 Algoritmo

7.2.1 Detección tanto de inicio como finalización del fallo en la red.

El algoritmo propuesto, como se ha comentado anteriormente, se encarga de identificar que la red eléctrica se encuentra en fallo, sensa continuamente el estado de las tensiones de red (V_a , V_b , V_c) y las procesa para determinar la situación de estas.

Para detectar el fallo de la red, el algoritmo utiliza las secuencias positivas y negativas del extractor que se puede ver en la Figura 7.1:2. La secuencia positiva es alterada cuando ocurren huecos del tipo A. Si al alterarse su valor este es inferior a 0.85 p.u. el algoritmo se pone en funcionamiento. Del mismo modo ocurre cuando la secuencia negativa es alterada (huecos tipo C-D) y su valor es superior a 0.05 p.u.

Con la información de la tensión de cada fase se realiza una comparación para determinar en cada momento cuál de las fases posee la tensión más baja y cuál tiene la tensión más elevada.

De esta forma, si en el resultado de la comparación, la tensión más baja se encuentra por debajo de los 0.85 p.u. habrá un hueco de tensión en la red. Mientras que si el mayor valor de tensión supera los 1.1 p.u. se estará produciendo una sobretensión.

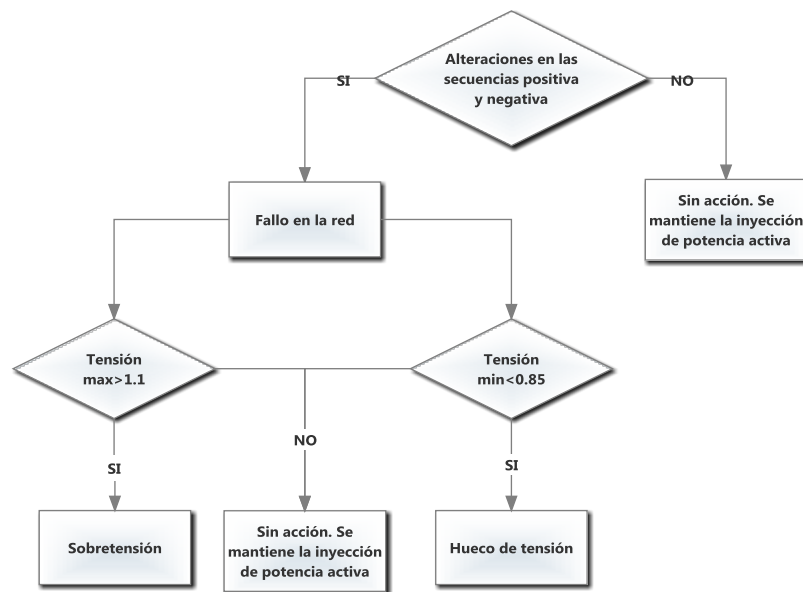


Figura 7.2:1 - Análisis del estado de la red eléctrica

7.2.2 Caracterizar fallo

Una vez el algoritmo ha detectado un fallo en la red el siguiente paso que realiza es caracterizarlo para poder solventarlo de la forma más eficiente. El sistema sensa constantemente las tensiones y las secuencias positivas y negativas para este efecto y caracteriza el fallo en función del tipo que sea (A, C, D) además de su profundidad.

El programa cuenta con 3 ajustes una vez realizado la caracterización para un funcionamiento óptimo.

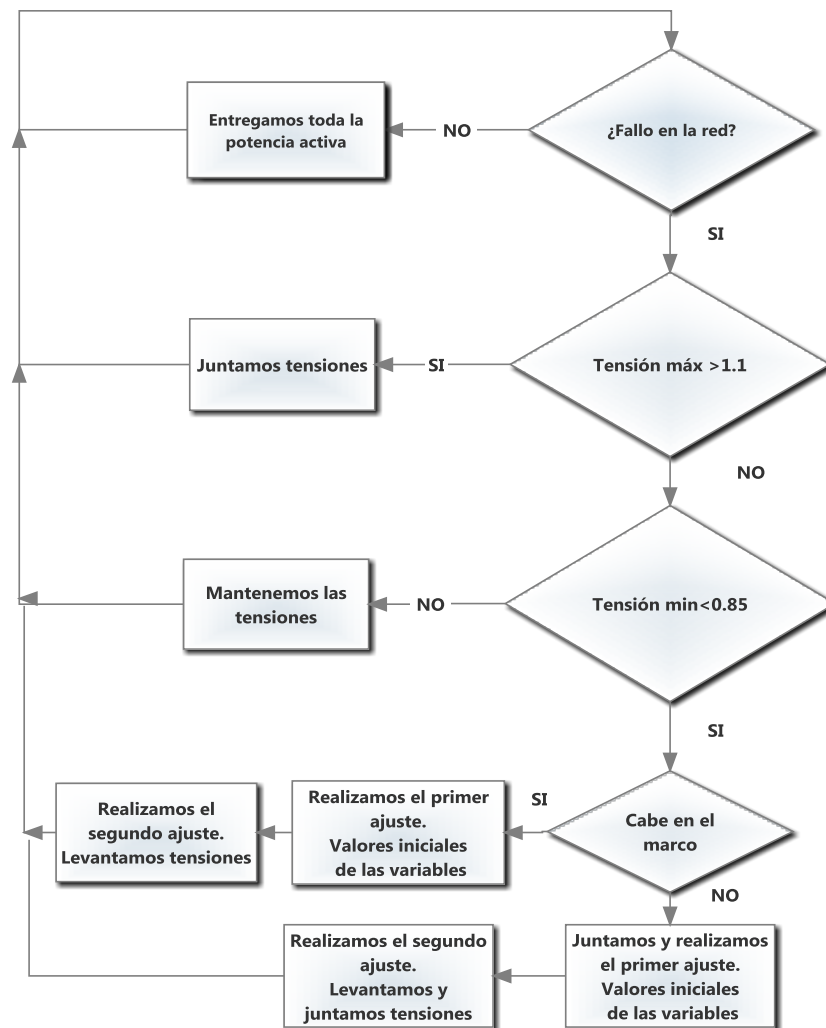


Figura 7.2:2 - Algoritmo general

7.2.2.1 Primer ajuste para determinar las características del hueco de tensión

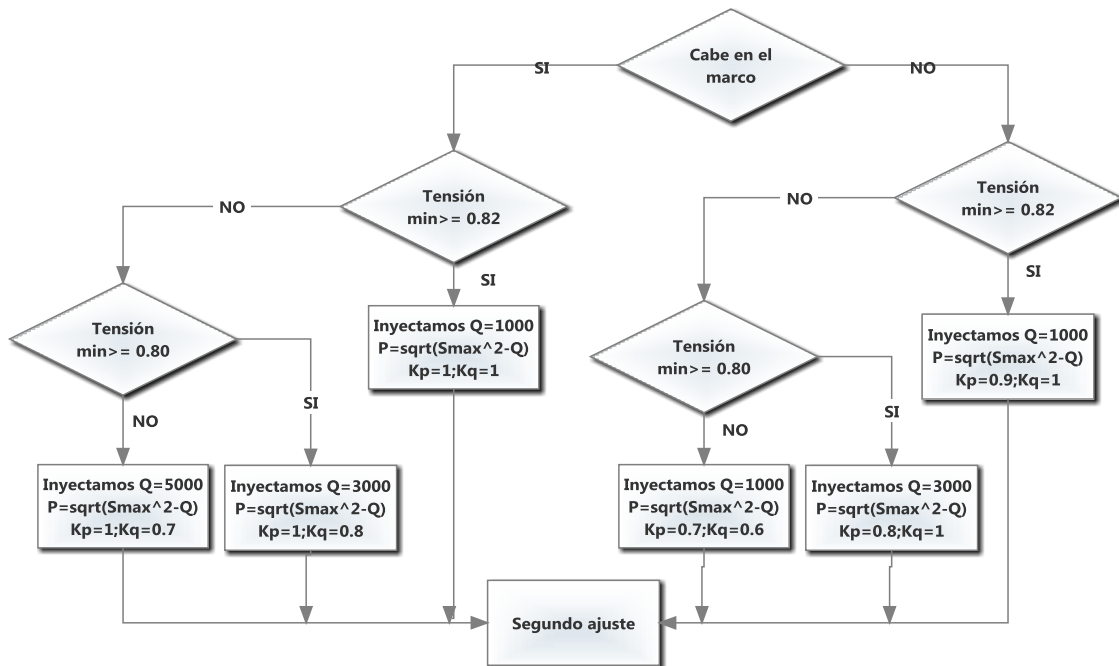


Figura 7.2:3 - Primer ajuste del algoritmo

El cometido del primer ajuste es el siguiente. En primera instancia evalúa las tensiones máximas y mínimas del hueco para conocer si entra dentro del marco, es decir, entre el rango 1.1-0.85. Si la resta de las tensiones es menor o igual a 0.25 el hueco se encuentra dentro del marco y viceversa y se actuará de la siguiente forma:

- Si nos encontramos dentro del marco el programa evaluará la profundidad del hueco comprendida en tres etapas. Si la tensión mínima es superior a 0.82, a 0.8 o bien inferior a 0.8. Para cada uno de los tres posibles casos se inyecta una cantidad específica de potencia reactiva que a su vez modifica la inyección de potencia activa (7.2:1). Además se fijan unos valores de Kq para elevar la tensión hasta el marco.
- Si nos encontramos fuera del marco el algoritmo actúa de igual forma que cuando estamos dentro con la modificación de que se reduce esta vez el valor de Kp para juntar las tensiones y conseguir que entren dentro de los límites.

$$P = \sqrt{S^2 - Q^2} \quad (7.2:1)$$

Este ajuste escalonado se realiza para acelerar el proceso de elevación de la tensión ya que si fuésemos inyectando potencia desde 0 no conseguiríamos solventar muchos huecos a causa de la poca duración de estos y del tiempo que lleva al sistema evaluar datos.

7.2.2.2 Segundo ajuste para entrar tensiones en márgenes



Figura 7.2:4 - Segundo ajuste del algoritmo

Si con el primer ajuste no se ha conseguido solventar el hueco este ajuste inyecta potencia y modifica los parametros K_p - K_q de forma continua hasta solventar el hueco.

Debido a que los valores de K_p y K_q oscilan entre 0-1 existe una combinación ideal que permite obtener la mayor eficiencia del sistema consumiendo el mínimo de corriente y mayor potencia activa. Para lograr tal combinación se han realizado múltiples iteraciones del sistema realizando combinaciones de K_p y K_q para los tipos de hueco más severo que el inversor puede solucionar con 10KVar.

Las siguientes gráficas muestran la mejor combinación de K_p - K_q para que las tensiones se acerquen al máximo al umbral del marco.

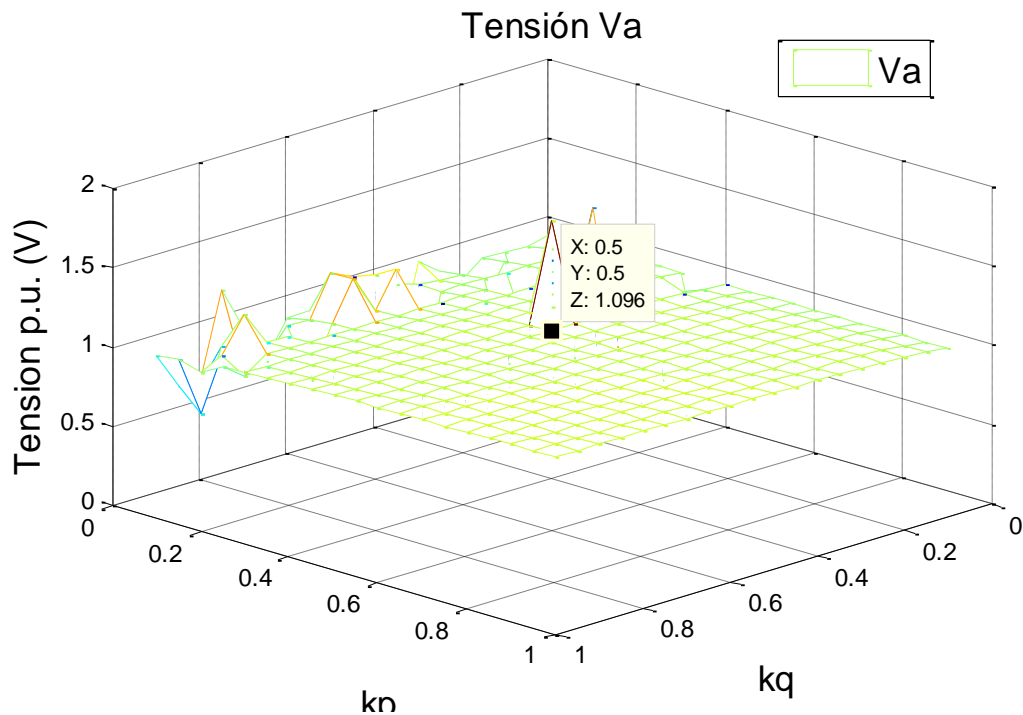


Figura 7.2:5 - V_a (K_p - K_q)

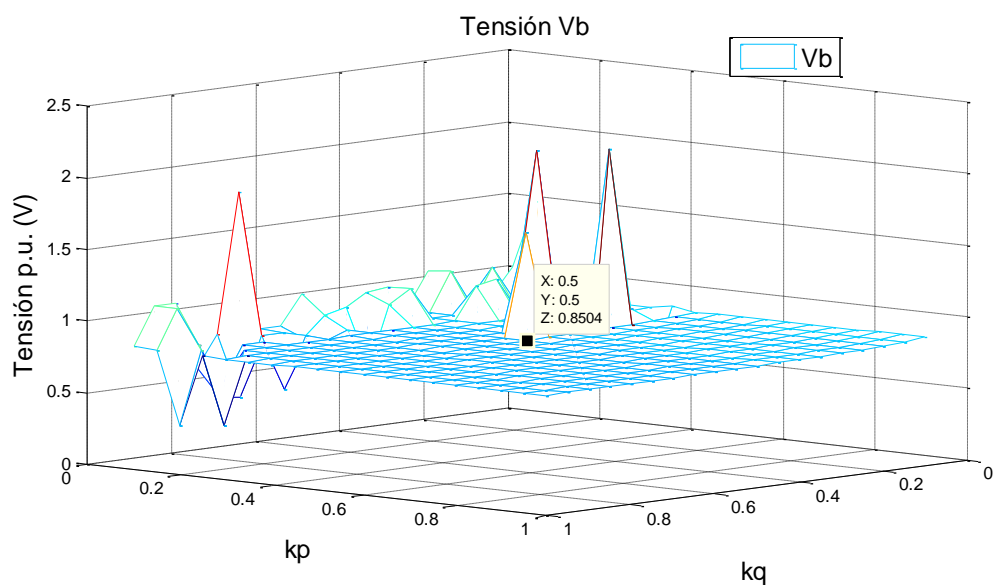


Figura 7.2:6 - Vb (Kp-Kq)

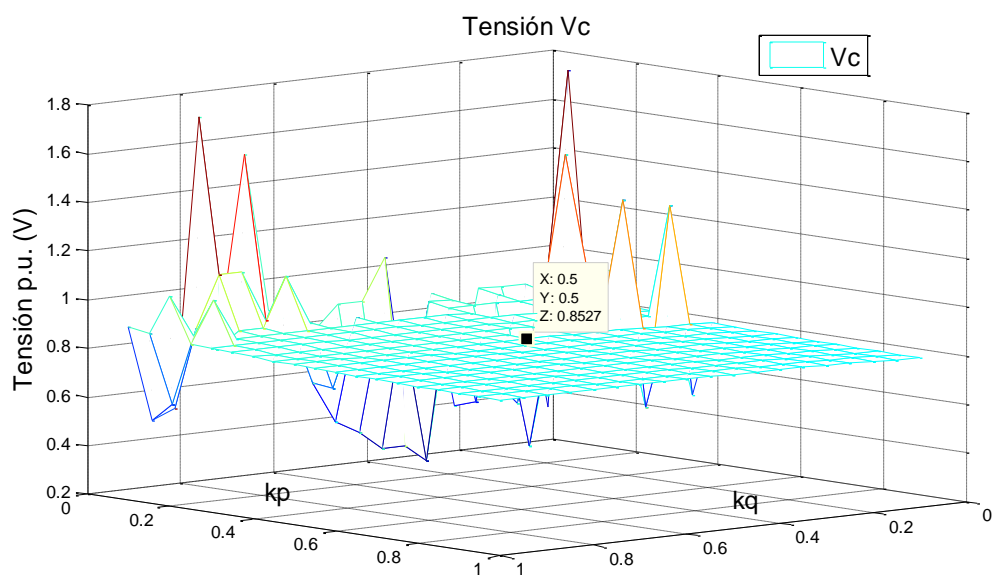


Figura 7.2:7 - Vc (Kp-Kq)

Este caso es un hueco tipo C con una profundidad máxima de 28% el cual los valores óptimos de K_p y K_q es 0.5. Ajustando la fase más caída que es Vb a una tensión de 0.8504 y la fase más alta Va a 1.096.

7.2.2.3 Tercer ajuste para reducir corriente.

Una vez el hueco se ha solventado el tercer ajuste se encarga de ajustar la tensión de mayor valor a 1.1 y la de menor valor a 0.85 para que de esta manera el gasto de corriente sea el menor posible.

7.3 Resultados

Con el fin de demostrar el correcto funcionamiento del nuevo algoritmo se han realizado dos pruebas a distinta profundidad de cada tipo de hueco estudiado.

En las gráficas que se presentan a continuación se muestran las tensiones de red, las corrientes inyectadas por el inversor a la red, las potencias activa y reactiva y las variables modificadoras de potencia K_p y K_q . Con estas gráficas se podrá ejemplificar y demostrar cómo responde el sistema ante fallos de la red eléctrica, viendo que sucede y cómo actúa el algoritmo de control propuesto.

7.3.1 Hueco tipo A

7.3.1.1 Profundidad del hueco de 24%

Después de someter el sistema a un hueco tipo A con una profundidad del 24% otorgada por la fase con menor tensión observamos lo siguiente:

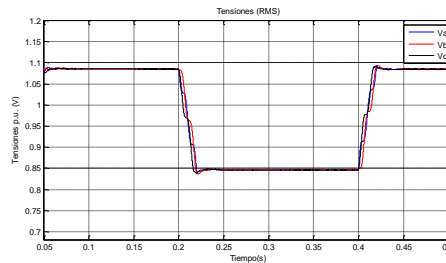


Figura 7.3:1 – Hueco tipo A con una profundidad del 24%(sin inyección)

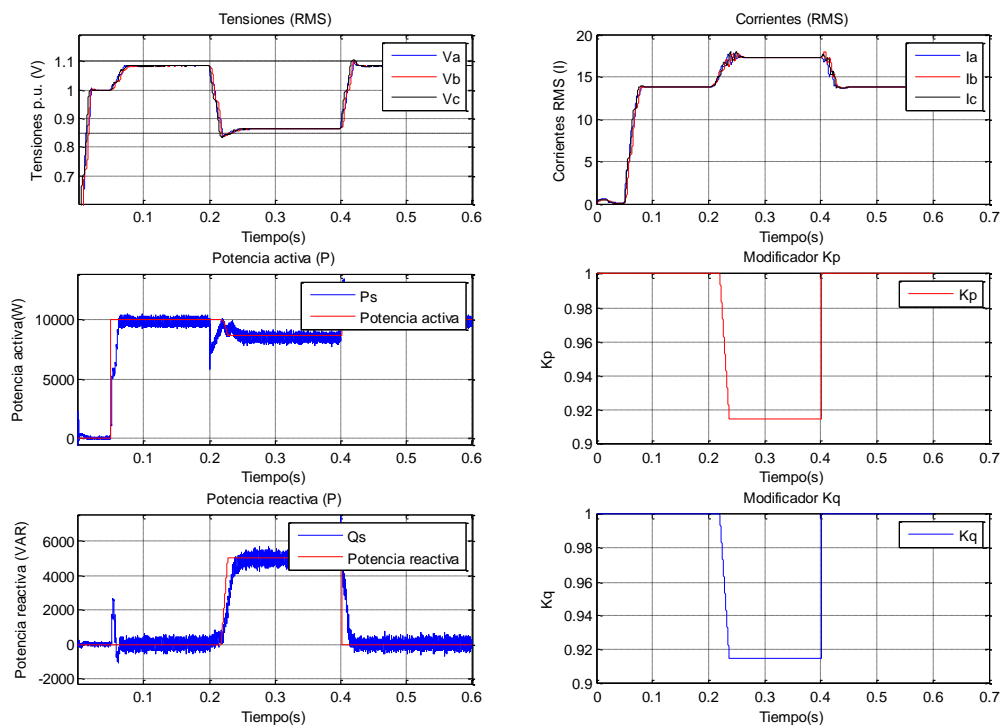


Figura 7.3:2 - Hueco tipo A con una profundidad del 24%

El sistema solventa rápidamente el hueco inyectando casi toda la potencia activa $P=8600$ y $Q=5000$. Ya que las fases han caído por igual las tres corrientes alcanzan un valor de 17A,

Los modificadores han caído por igual brevemente ya que no se tenido que juntar ni levantar en exceso.

7.3.1.2 Profundidad del hueco de 26%

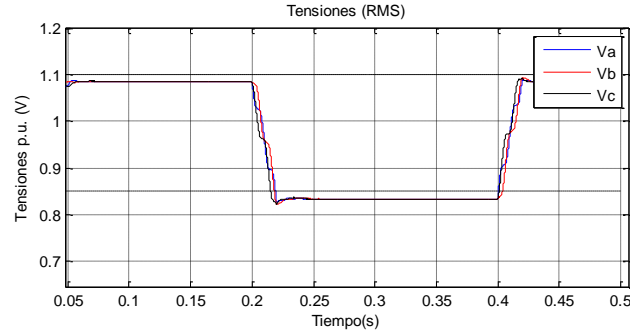


Figura 7.3:3 - Hueco tipo A con una profundidad del 26% (sin inyección)

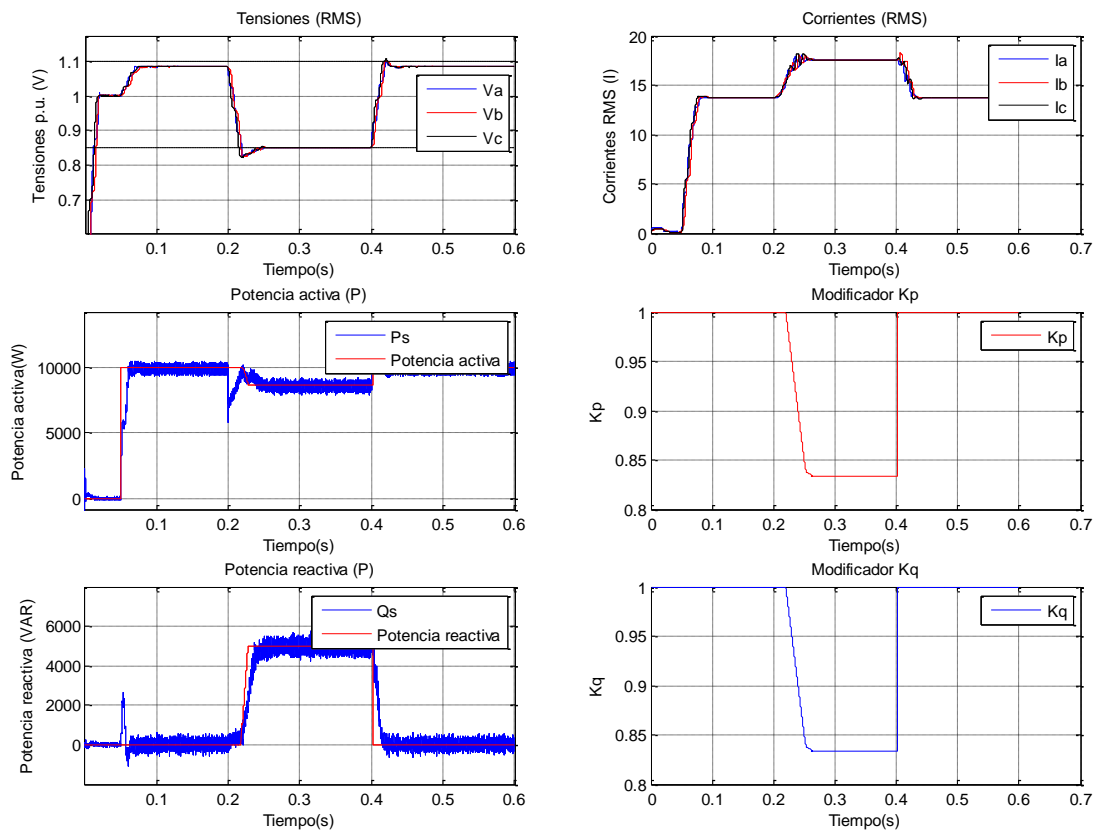


Figura 7.3:4 - Hueco tipo A con una profundidad del 26%

En este ejemplo la profundidad del hueco es mayor y la cantidad de potencia activa que entrega es de 8000 mientras que la reactiva de 5500.

Las corrientes son algo superiores al ejemplo anterior ya que la cantidad de potencia reactiva inyectada es mayor y los parámetros K han descendido algo más.

7.3.2 Hueco tipo C

7.3.2.1 Profundidad del hueco de 23%

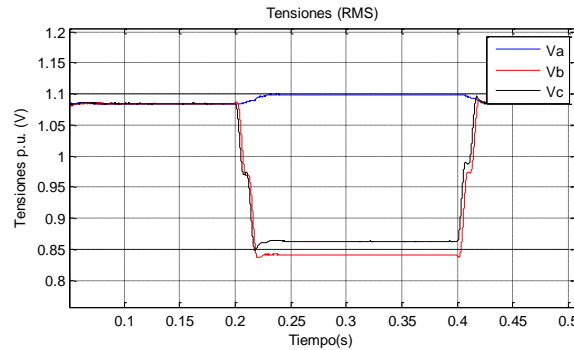


Figura 7.3:5 - Hueco tipo C con una profundidad del 23% (sin inyección)

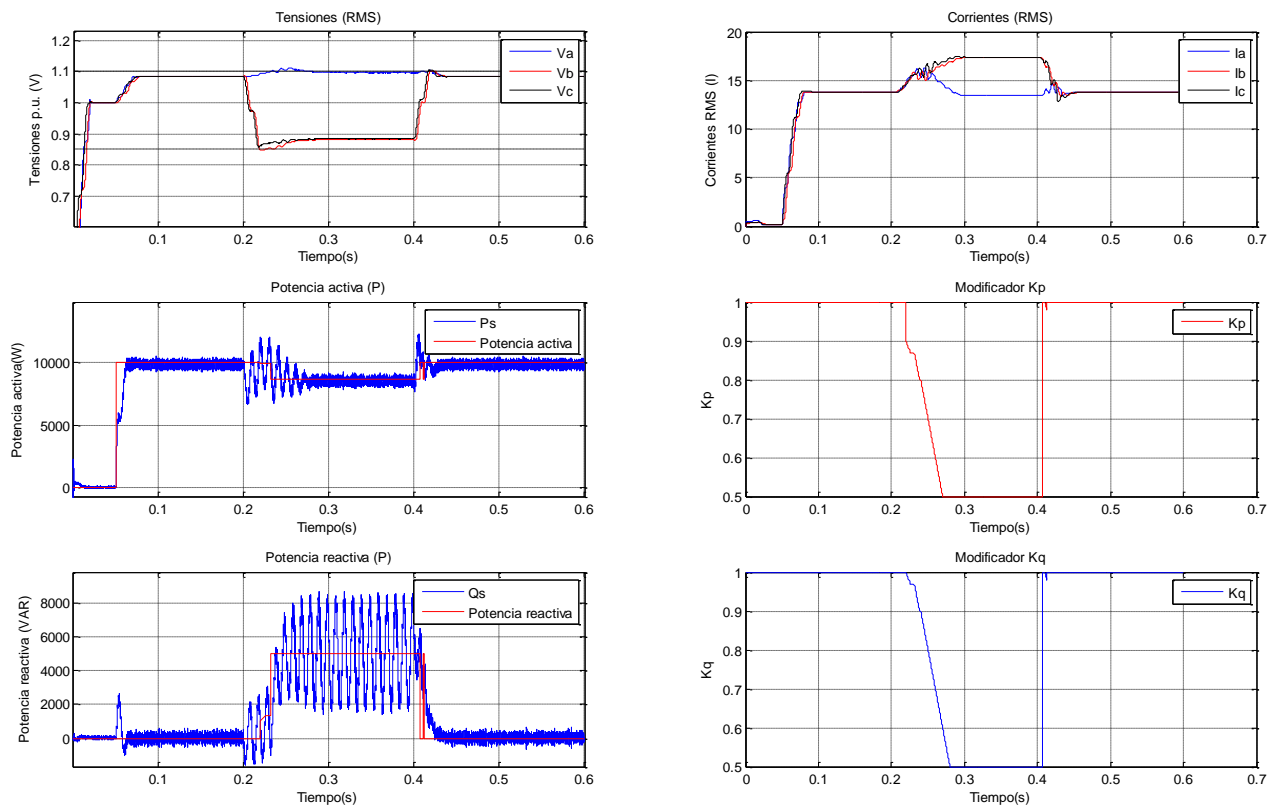


Figura 7.3:6 - Hueco tipo C con una profundidad del 23%

La Figura 7.3:6 representa un hueco tipo C con una caída de las tensiones al 23% del valor normal.

Las corrientes Ib e Ic adquieren se encuentran en 18A separadas de Ia debido a que Va no ha caído y se ha mantenido al límite gracias a una buena combinación de K que en este caso es 0.5.

7.3.2.2 Profundidad del hueco de 28%

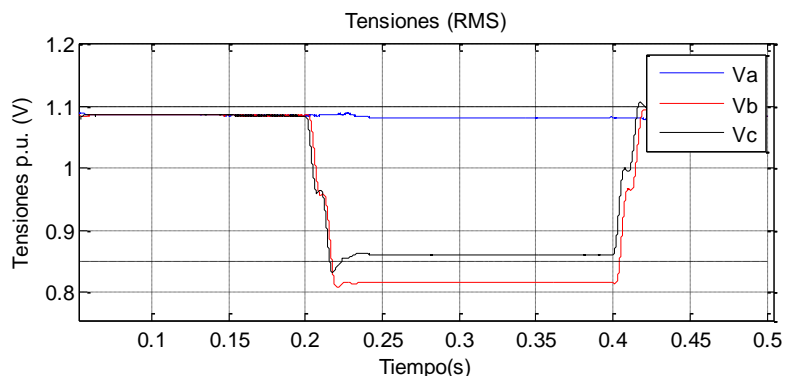


Figura 7.3:7 - Hueco tipo C con una profundidad del 28% (sin inyección)

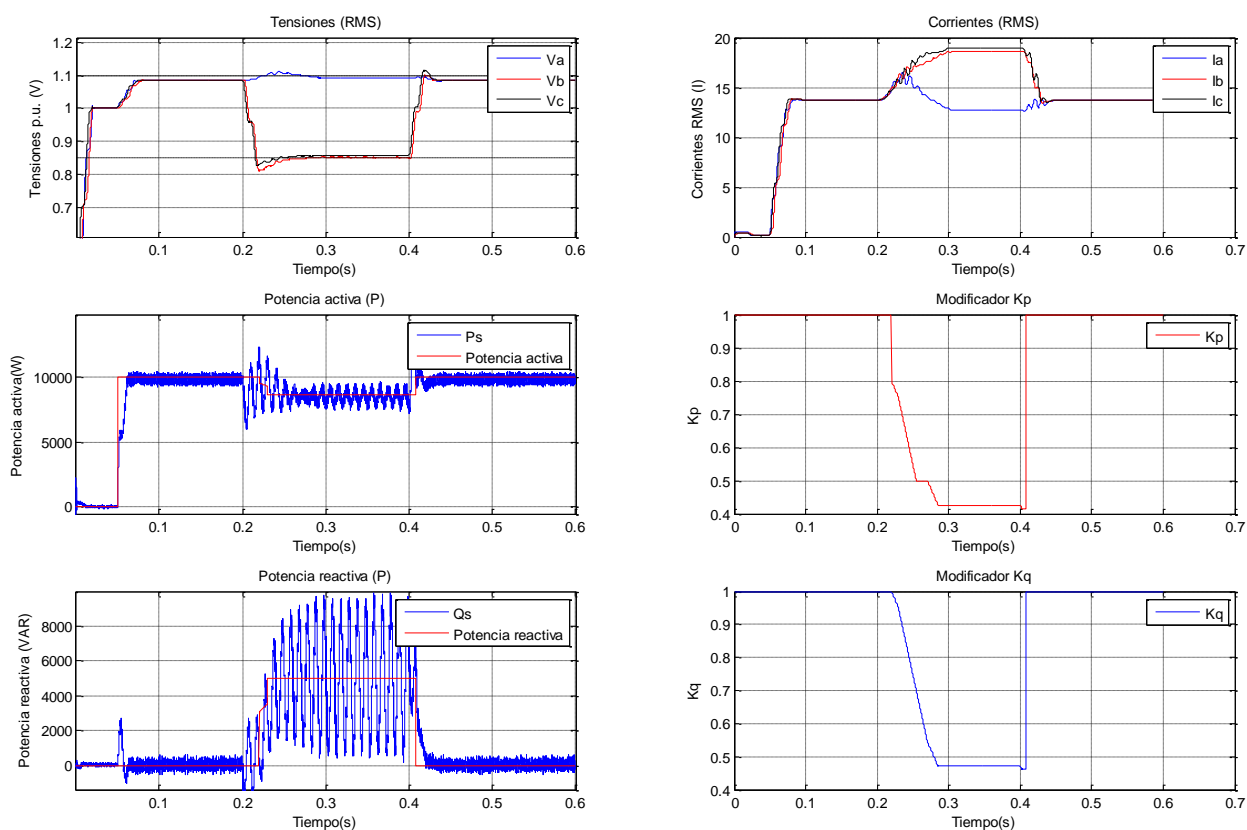


Figura 7.3:8 - Hueco tipo C con una profundidad del 28%

Este es el hueco tipo C que mayor profundidad es capaz de solventar utiliza la máxima combinación de potencia para plantas de 30° que es $P=8660$ y $Q=5000$.

Como se aprecia las dos corrientes I_b e I_c se separan bastante de I_a casi con un valor aproximado de 19A.

Los valores de K han bajado considerablemente llegando K_p a 4.2 y K_q a 4.9.

7.3.3 Hueco tipo D

7.3.3.1 Profundidad del hueco de 25%

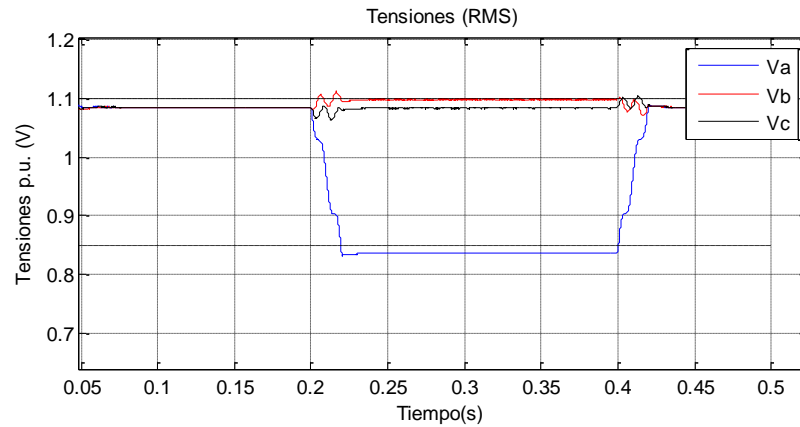


Figura 7.3:9 - Hueco tipo D con una profundidad del 25% (sin inyección)

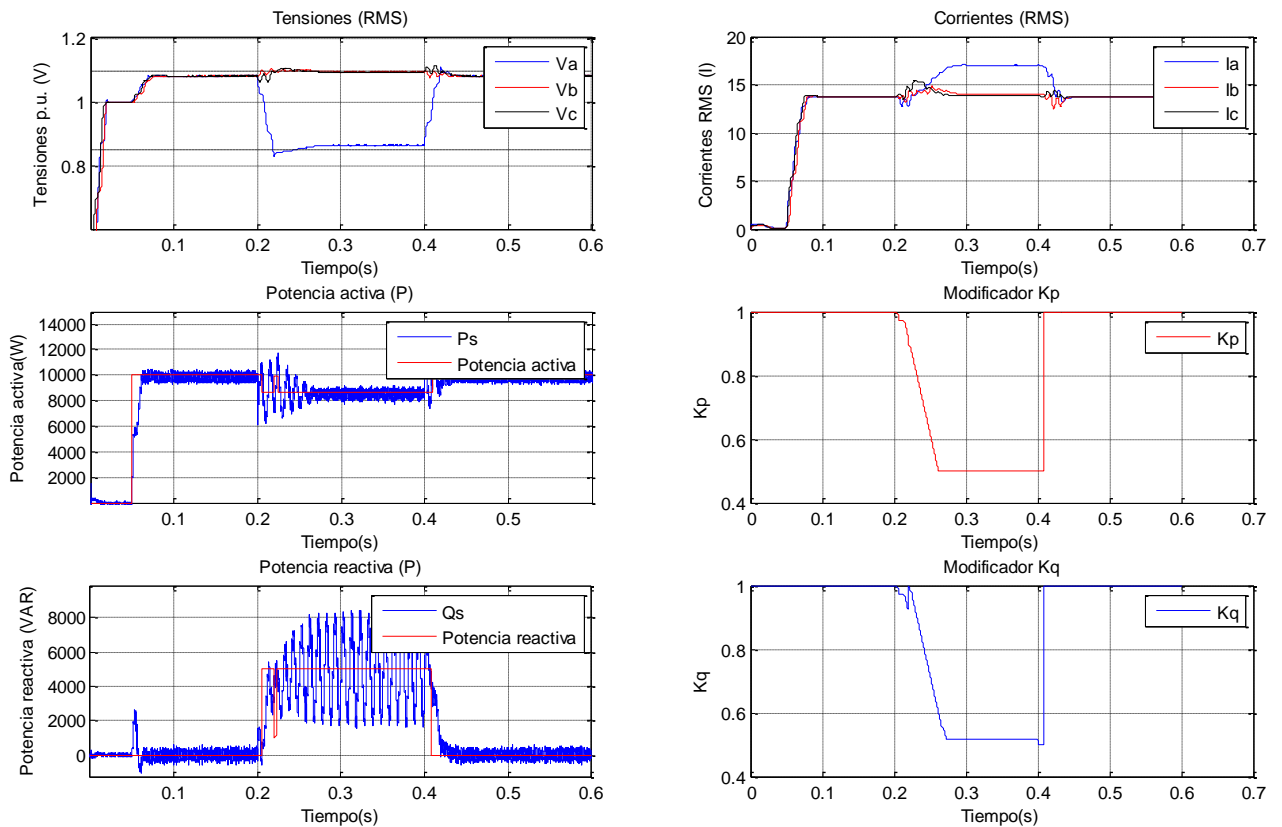


Figura 7.3:10 - Hueco tipo D con una profundidad del 25%

En el siguiente hueco tan solo cae una de las fases y lo hace a un 25%.

Pese a que se realiza una generosa inyección de potencia reactiva la corriente implicada en la fase a no se eleva demasiado debido a que los parámetros K crean una configuración óptima. Esto se refleja en las tensiones que recorren el umbral del marco.

7.3.3.2 Profundidad del hueco de 32%

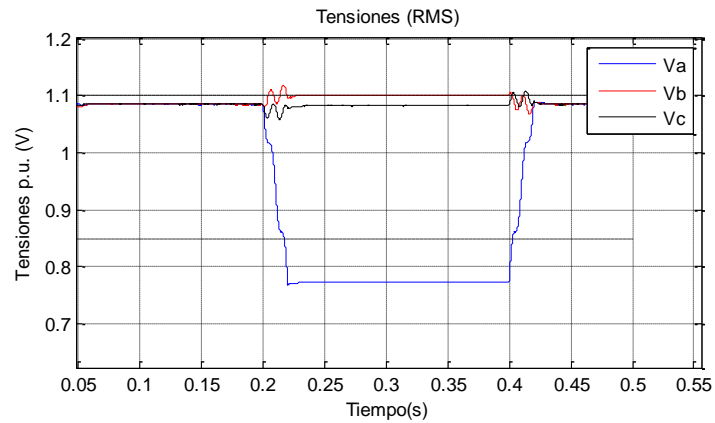


Figura 7.3:11 Hueco tipo D con una profundidad del 32% (sin inyección)

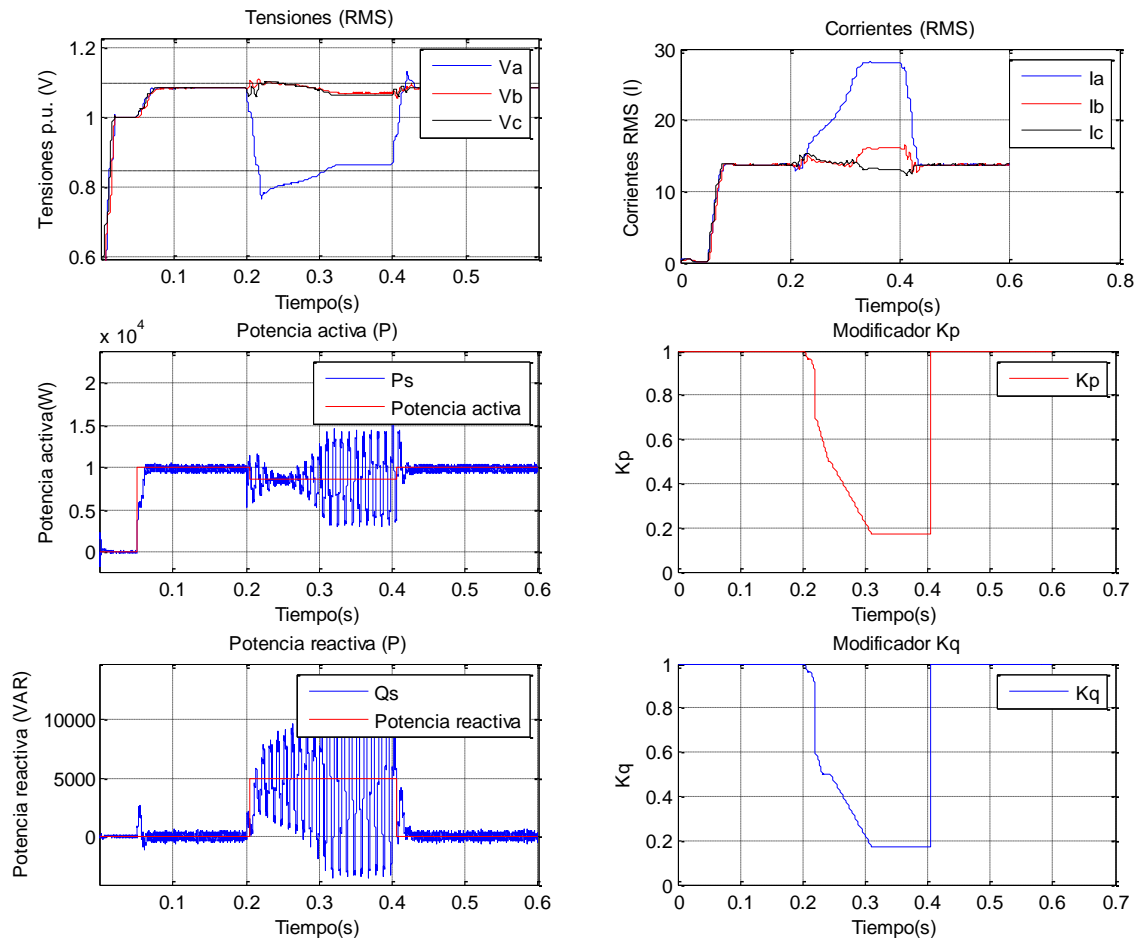
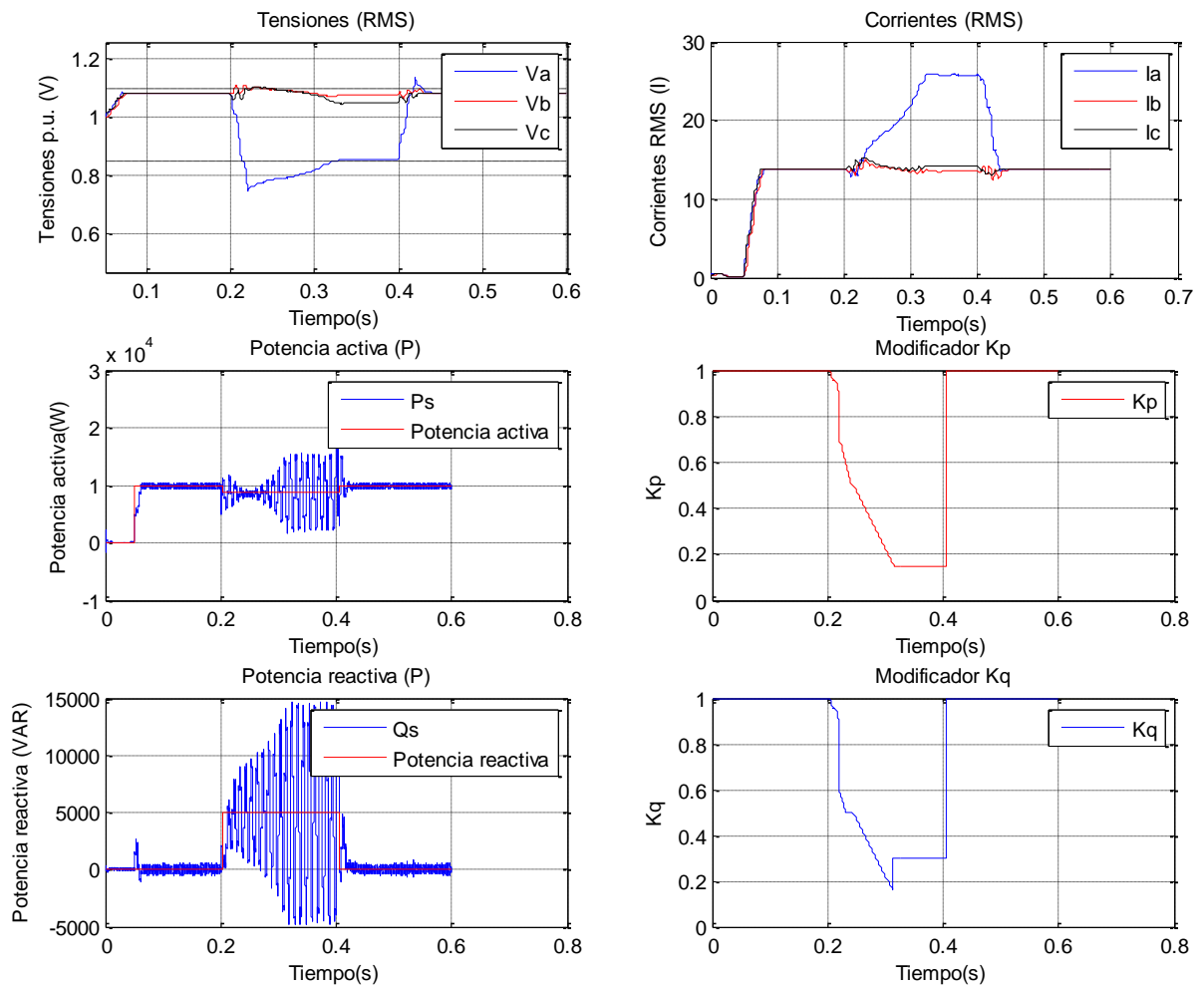


Figura 7.3:12 - Hueco tipo D con una profundidad del 32%

Un 32% de caída es la mayor tensión que es capaz de elevar el inversor con una potencia de 10KVAR.

Se puede observar el tiempo que lleva al sistema conseguir que las 3 tensiones entren dentro del marco. Para lograr este objetivo se ha disminuido al mínimo valor tanto K_p , como K_q sin que el sistema entre en inestabilidad. Esto ha provocado que la secuencia negativa aumente y provoque el enorme gasto de corriente.

En la siguiente imagen observamos el mismo hueco pero resuelto con mayor eficiencia realizando el tercer ajuste. Se puede observar que las tensiones se ajustan mas a los margenes provocando con ello un menor gasto de corriente.



8 Conclusiones y perspectivas de trabajo

En los siguientes apartados se reflejan las conclusiones finales de todo el estudio así como las perspectivas de trabajo futuras.

8.1 Conclusiones

Los 2 objetivos planteados en el proyecto han sido, en primera instancia, realizar un análisis del sistema para observar el funcionamiento de este y las tendencias de las tensiones, corrientes y las cuatro variables del controlador (Potencia activa, reactiva, y los modificadores K_p y K_q) y después solventar huecos de tensión de los tipos A, C y D en una planta de 30° con una potencia máxima de 10KVar.

Considero que he se han cumplido los objetivos marcados en el proyecto. Tanto el estudio estático del sistema cómo el restablecimiento de la tensión frente a un hueco de tensión.

En el análisis estático del sistema se han hallado las mejores combinaciones de potencia tanto activa como reactiva con sus respectivos modificadores de control para la planta de un sistema de 30° que en su mayoría tiene un comportamiento resistivo. Se ha comprobado, cómo se sospechaba, que es más efectivo la inyección de potencia activa sin embargo se obtienen los mejores resultados realizando una combinación de estas inyectando alrededor de un 60% de potencia activa y un 40% de reactiva en los casos más severos.

El algoritmo es capaz de solventar huecos tipo C de una profundidad del 32%, huecos del tipo D de hasta un 28% y del tipo A con una caída máxima del 26%. Todos ellos se han solventado con una gran velocidad los 3 tipos de huecos que se han tratado de forma eficiente actuando rápidamente una vez detectado el hueco y haciendo un gasto mínimo de corriente.

También se ha tenido en cuenta la importancia de otorgar en todo momento la máxima potencia activa y se ha logrado en todo momento bajando menos de un 20% durante el fallo, es decir 0.2s, en los casos más severos.

8.2 Perspectivas de trabajo

Un trabajo futuro que se podría realizar sería elevar la potencia del inversor o trabajar con varios de ellos en paralelo para solventar huecos más profundos.

En este trabajo no se ha tenido en cuenta el gasto máximo de corriente a la hora de corregir huecos. Así que otra perspectiva sería la de limitar el consumo de corriente máximo para no dañar el inversor físicamente.

También sería muy interesante modificar el algoritmo para que detecte el tipo de planta sobre la que se encuentra actuando y se adapte a ella automáticamente para crear un sistema más polivalente.



Referencias

- [1] http://eia.udg.es/~secse/curso_calidad/
- [2] [http://www.cne.es/cne/doc/legislacion/\(36\)RD436_2004.pdf](http://www.cne.es/cne/doc/legislacion/(36)RD436_2004.pdf)
- [3] Norma UNE-EN 50160. Características de la tensión suministrada por la redes de distribución. Octubre 1996.
- [4] Norma IEC-61000-2-8. Compatibilidad electromagnética. Resultados de medidas estadísticas de huecos de tensión e interrupciones en redes de servicio público. Noviembre 2002.
- [5] P. Rodríguez, A. Luna, I. Candela, R. Mújal, and F. Blaabjerg. "Multiresonant Frequency-Locked Loop for Grid Synchronization of Power Converters Under Distorted Grid Conditions" IEEE Trans. On industrial electronics, vol. 58. No. 1, January 2011.
- [6] S. Seguí, F. J. Gimeno, R. Masot, S. Orts "Control Vectorial de inversores trifásicos/1 y2" Revista española de electrónica, ISSN 0482-6396, no 582, March 2003.
- [7] Castilla, M. Miret, J. Sosa, J.L. Matas, J. de Vicuña, L.G. "Grid-Fault Control Scheme for Three-Phase Photovoltaic Inverters With Adjustable Power Quality Characteristics" IEEE Trans. On industrial electronics, vol. 25. No. 12, Dec. 2010

